

**TUGAS AKHIR - TM184835**

**PERANCANGAN BILAH TURBIN ANGIN SKALA MIKRO  
TSD-500 JENIS *TAPER* BERMATERIALKAN SERAT SISAL-  
EPOKSI DI LENTERA BUMI NUSANTARA DENGAN  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**MOHAMMAD TAREQH AL-FAQIH NASUTION**

**NRP. 02111840000112**

Dosen Pembimbing

**Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.**

**NIP. 196807061999031004**

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

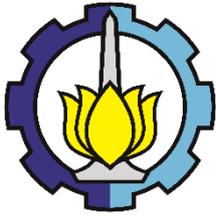
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Surabaya

Surabaya

2022

-



TUGAS AKHIR - TM184835

**PERANCANGAN BILAH TURBIN ANGIN SKALA MIKRO  
TSD-500 JENIS *TAPER* BERMATERIALKAN SERAT SISAL-  
EPOKSI DI LENTERA BUMI NUSANTARA DENGAN  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**MOHAMMAD TAREQH AL-FAQIH NASUTION**

NRP. 02111840000112

Dosen Pembimbing

**Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.**

NIP. 196807061999031004

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

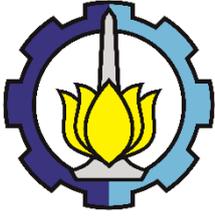
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*



**FINAL PROJECT - TM184835**

**A DESIGN OF SMALL TAPERED WIND TURBINE BLADE  
TSD-500 USING MATERIAL SISAL FIBER-EPOXY ON  
LENERA BUMI NUSANTARA USING FINITE ELEMENT  
METHOD**

**Mohammad Tareq Al-Faqih Nasution**

**NRP. 02111840000112**

**Advisor**

**Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.**

**NIP. 196807061999031004**

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Departement of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2022

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## LEMBAR PENGESAHAN

# PERANCANGAN BILAH TURBIN ANGIN SKALA MIKRO TSD-500 JENIS *TAPER* BERMATERIALKAN SERAT SISAL-EPOKSI DI LENTERA BUMI NUSANTARA DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

## TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution**  
NRP. 02111840000112

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

Pembimbing

2. Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.

Penguji 1

3. Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D.

Penguji 2



**SURABAYA**  
**Juli, 2022**

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## APPROVAL SHEET

### A DESIGN OF SMALL TAPERED WIND TURBINE BLADE TSD-500 USING MATERIAL SISAL FIBER-EPOXY ON LENTERA BUMI NUSANTARA USING FINITE ELEMENT METHOD

#### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at  
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

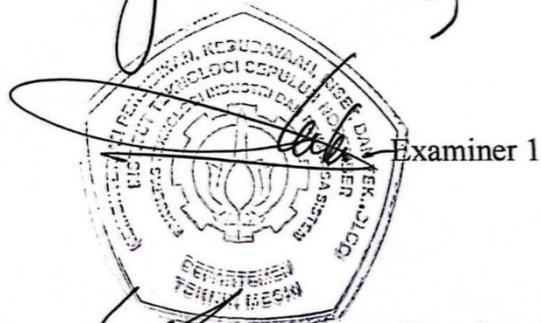
By: **Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution**  
NRP. 02111840000112

Approved by Final Project Proposal Examiner Team:

1. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

  
Advisor

2. Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.

  
Examiner 1

3. Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D.

  
Examiner 2

**SURABAYA**  
July, 2022

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution / 02111840000112

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T./ 196807061999031004

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perancangan Bilah Turbin Angin Skala Mikro Tsd-500 Jenis *Taper* Bermaterialkan Serat Sisal-Epoksi di Lentera Bumi Nusantara dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga” adalah hasil saya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing

(Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.)

NIP. 196807061999031004

Mahasiswa,

(Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution)

NRP. 02111840000112

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution / 02111840000112

Department : Teknik Mesin

Advisor / NIP : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T./ 196807061999031004

Hereby declare that the Final Project with the title of “A Design of Small Tapered Wind Turbine Blade Tsd-500 using Material Sisal Fiber-Epoxy on Lentera Bumi Nusantara using Finite Element Method” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 July 2022

Acknowledged

Advisor

  
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.  
NIP. 196807061999031004  


Student,

  
(Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution)  
NRP. 02111840000112

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

# PERANCANGAN BILAH TURBIN ANGIN SKALA MIKRO TSD-500 JENIS *TAPER* BERMATERIALKAN SERAT SISAL-EPOKSI DI LENTERA BUMI NUSANTARA DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : **Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution**  
NRP : **02111840000112**  
Jurusan : **Teknik Mesin FTIRS-ITS**  
Dosen Pembimbing : **Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.**

## Abstrak

Energi Baru Terbarukan (EBT) merupakan salah satu energi alternatif yang sudah banyak digunakan di berbagai belahan dunia. Salah satu contoh EBT adalah energi angin. Pemanfaatan energi angin di Indonesia masih dapat dikatakan sangat kurang dan belum maksimal. Hal ini dibuktikan dengan Indonesia yang memiliki potensi pemanfaatan energi angin dengan total daya 9290 MW, namun hingga tahun 2020 Indonesia hanya mampu memanfaatkan potensi energi angin dengan total daya sebesar 135 MW atau hanya sebesar 1%. Turbin angin merupakan salah satu solusi dalam menjawab permasalahan diatas. Dalam perancangan bilah turbin angin tentu diperlukan beberapa aspek utama, yaitu efisiensi dan kekuatan struktural material.

Dalam penelitian ini dilakukan perancangan geometri bilah turbin angin skala mikro dengan jenis *taper*. Lalu, dilakukan simulasi untuk mengetahui kekuatan struktural dari material bilah turbin angin. Material yang diterapkan pada bilah adalah komposit serat sisal-*epoxy* jenis *unidirectional* dengan ketebalan laminasi 2 mm. Penyusunan laminasi komposit dilakukan dengan variasi sudut orientasi komposit sebesar  $[\pm 35^\circ]_2$ ,  $[\pm 35^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 45^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 45^\circ]_2$ ,  $[\pm 55^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 55^\circ]_2$ ,  $[0^\circ/90^\circ]_s$ , dan  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ . Proses perancangan geometri bilah dilakukan dengan menggunakan *software* Qblade v0.963 dan Solidworks, kemudian perancangan dan simulasi kekuatan dari struktur material dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys 2020 R2. Penelitian dilakukan dengan mengilustrasikan kondisi kecepatan angin maksimal yang terjadi di Lentera Bumi Nusantara, yaitu sebesar 17 m/s.

Hasil penelitian ini diperoleh bilah *taper* hasil rancangan memiliki performa yang baik dengan nilai torsi optimal sebesar 13,7 Nm pada saat kecepatan putar 430 rpm, memiliki daya output optimal sebesar 656,6 watt pada saat kecepatan putar 473 rpm, dan mampu menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 47% pada saat TSR 5,5. Kemudian, material bilah turbin angin dengan menggunakan sisal-epoksi didapatkan bahwa variasi sudut orientasi terbaik adalah sudut  $[\pm 35]_{2s}$ . Hal ini dibuktikan dengan nilai dari deformasi yang terjadi pada orientasi sudut  $[\pm 35]_{2s}$  merupakan nilai deformasi yang paling kecil jika dibandingkan dengan orientasi sudut lainnya. Disamping itu, nilai dari safety factor terbaik didapatkan pada orientasi sudut ini dengan nilai minimum safety factor adalah 1,27. Namun, nilai dari tegangan von-Mises yang terjadi pada orientasi sudut ini memiliki tegangan von Mises terendah ke-2 dari seluruh variasi orientasi sudut lainnya. Meskipun demikian, sudut ini memiliki karakterisasi komposit yang terbaik dalam pembebanan yang terjadi pada bilah. Berdasarkan hasil tersebut, sudut  $[\pm 35]_{2s}$  juga layak untuk diimplementasikan dikarenakan nilai safety factor yang berada diatas rentang batas aman bilah turbin angin.

**Kata kunci** : *turbin angin skala mikro, komposit sisal-epoksi, perancangan bilah turbin angin*

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

# A DESIGN OF SMALL TAPERED WIND TURBINE BLADE TSD-500 USING MATERIAL SISAL FIBER-EPOXY ON LENTERA BUMI NUSANTARA USING FINITE ELEMENT METHOD

**Name** : Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution / 02111840000112  
**NRP** : 02111840000112  
**Department** : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
**Supervisor** : Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T.

## Abstract

New and Renewable Energy (NRE) is an alternative energy that has been widely used in various parts of the world. One example of NRE is wind energy. The utilization of wind energy in Indonesia can still be said to be very lacking and not optimal. This is evidenced by Indonesia which has the potential to utilize wind energy with a total power of 9290 MW, but until 2020 Indonesia is only able to utilize the potential of wind energy with a total power of 135 MW or only 1%. Wind turbines are one solution to the above problems. In the design of wind turbine blades, of course, several main aspects are needed, namely the efficiency and structural strength of the material.

In this research, the design of the micro-scale wind turbine blade geometry with a taper type is carried out. Then, a simulation is carried out to determine the structural strength of the wind turbine blade material. The material applied to the blade is a unidirectional sisal-epoxy fiber composite with a laminate thickness of 2 mm. The composite laminate was arranged with variations in the orientation angle of the composites of  $[\pm 35^\circ]_2$ ,  $[\pm 35^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 45^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 45^\circ]_2$ ,  $[\pm 55^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 55^\circ]_2$ ,  $[0^\circ/90^\circ]_s$ , and  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ . The blade geometry design process is carried out using the Qblade v0.963 software and Solidworks, then the design and simulation of the strength of the material structure is carried out using the Ansys 2020 R2 software. The study was conducted by illustrating the condition of the maximum wind speed that occurs in Lentera Bumi Nusantara, which is 17 m/s.

The results of this study obtained that the designed taper blade has a good performance with an optimal torque value of 13.7 Nm at a rotational speed of 430 rpm, has an optimal output power of 656.6 watts at a rotational speed of 473 rpm, and is able to produce a maximum efficiency of 47% at the time of TSR 5.5. Then, the wind turbine blade material using sisal-epoxy found that the best orientation angle variation is the angle of  $[\pm 35]_{2s}$ . This is evidenced by the value of the deformation that occurs at the angle orientation  $[\pm 35]_{2s}$  which is the smallest deformation value when compared to other angle orientations. In addition, the value of the best safety factor is obtained at this angle orientation with a minimum safety factor value of 1.27. However, the value of the von-Mises stress that occurs at this angle orientation has the 2nd lowest von Mises stress of all other angle orientation variations. However, this angle has the best composite characterization in the loading that occurs in the blade. Based on these results, the angle of  $[\pm 35]_{2s}$  is also feasible to implement because the safety factor value is above the safe limit range of the wind turbine blades.

**Keywords:** *micro-scale wind turbine, sisal-epoxy composite, wind turbine blade design*

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul Perancangan Bilah Turbin Angin Skala Mikro TSD-500 Jenis *Taper* Bermaterialkan Serat Sisal-Epoksi di Lentera Bumi Nusantara dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Melalui kesempatan ini, izinkan penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moral maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain :

1. Ayah M. Elvin Nasution dan Ibu Apriana selaku kedua orang tua serta abang Rakhil dan adik Afifah yang selalu memberikan dukungan doa, kasih sayang, dan motivasi terus menerus sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja. M.T, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberikan arahan, motivasi, dan perhatian selama bimbingan kepada penulis. Semua bimbingan tersebut sangat membantu penulis dalam menjadi pribadi yang lebih baik.
3. Bapak Alief Wikarta, S. T., M.Sc.Eng., Ph.D, Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc. , dan Bapak Putu Suwarta, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan masukan dan saran kepada penulis dalam tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T., selaku dosen wali penulis yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama penulis menjalani perkuliahan.
5. Herliyana Mei Rini selaku tempat penulis mencurahkan pemikiran, suka maupun duka sehingga seluruh waktu dan perhatian yang telah diberikan dapat memotivasi penulis dalam menjalani kegiatan perkuliahan.
6. Seluruh teman satu bimbingan (Kelpo, Jay, Komeng, Aldi) serta teman-teman pejuang TA Komposit (Bang Jerbas, Vicky, Edo, Fajli, Ajis, Ganesh) yang selalu menemani penulis di Lab. MBP dari malam hingga pagi.
7. Seluruh pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin ITS 2020/2021 khususnya Badan Pengurus Harian Apollo dan para Bapak-Bapak Kepala Departemen yang telah memberikan momen-momen berharga dan kenangan indah selama penulis menjadi pengurus.
8. Seluruh teman-teman angkatan M61 yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.
9. Mentor dan seluruh teman teman Cihuy di LBN yang memberikan penulis pemahaman terkait bilah turbin angin skala mikro.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	VII
APPROVAL SHEET.....	IX
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	XI
STATEMENT OF ORIGINALITY .....	XIII
ABSTRAK .....	XV
ABSTRACT .....	XVII
KATA PENGANTAR.....	XIX
DAFTAR ISI .....	XXI
DAFTAR GAMBAR.....	XXV
DAFTAR TABEL .....	XXIX
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Dasar Teori .....	5
2.1.1 Energi Angin & Teori Betz Element Momentum.....	5
2.1.2 Turbin Angin .....	7
2.1.3 Bilah Turbin Angin .....	11
2.1.4 Perancangan Bilah Turbin Angin.....	14
2.1.5 Turbin Angin TSD-500 .....	15
2.1.6 <i>Blade Element Momentum Theory</i> .....	16
2.1.7 Komposit .....	18
2.1.8 Serat Alam.....	21
2.1.9 Epoxy Resin.....	24
2.1.10 <i>Rules of Mixtures</i> .....	25
2.1.11 <i>Stiffness</i> ABD Matriks.....	27
2.1.12 Teori Kegagalan .....	29
2.1.13 <i>Finite Element Method (FEM)</i> .....	30
2.1.14 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i> .....	32
2.1.15 <i>Safety Factor</i> .....	34
2.1.16 <i>Fluid Structure Interaction</i> .....	35
2.1.17 Qblade .....	36
2.2 Penelitian Terdahulu .....	37
2.2.1 “ <i>Simulasi Kekuatan Struktur Kayu Pinus Terhadap Pembebanan Pada Turbin Angin Sumbu Horizontal Skala Mikro</i> ” (Dirgantini, 2021) .....	37
2.2.2 <i>Rancang Bangun Baling-Baling Kincir Angin Menggunakan NACA 4412 dan 4415 dari Bahan Kayu Mahoni (Swietenia macrophylla) dan Pinus (Pinus merkusii)</i> (Dahlan, 2016).....	40

2.2.3 <i>Fluid Structure Interaction Modelling of Horizontal-axis Wind Turbine Blades Based on CFD and FEA</i> (Wang, Quant, & Kolios, 2015) .....	42
2.2.4 <i>Fatigue of sisal fibre reinforced composites : Constant-life diagrams and hysteresis loop capture</i> (Towo & Ansell, 2008) .....	46
BAB III METODE PENELITIAN .....	49
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	49
3.2 Studi Literatur.....	50
3.3 Perumusan Masalah & Tujuan Penelitian .....	50
3.4 Pengumpulan Data <i>Material Properties</i> .....	50
3.5 Diagram Alir Perancangan Geometri Bilah Turbin Angin .....	51
3.6 Perancangan dan Pemodelan 3D CAD.....	52
3.6.1 Pemilihan <i>Airfoil</i> .....	52
3.6.2 Penentuan Parameter Bilah .....	53
3.6.3 Pemodelan 3D CAD.....	55
3.7 Diagram Alir Perancangan Struktur dan Simulasi Kekuatan Struktur Bilah Turbin .....	58
3.8 Pemodelan Numerik Simulasi Kekuatan Struktur Bilah.....	59
3.8.1 Simulasi Computational Fluid Dynamics.....	59
1. Pemodelan Domain Fluida .....	59
2. Meshing .....	60
3. Model Turbulensi .....	63
4. Solution Method.....	63
5. Uji Konvergensi Grid Independence Test .....	65
6. Post-Processing .....	66
3.8.2 Simulasi Static Structural .....	67
1. Penyusunan <i>Material</i> Komposit.....	70
2. Meshing .....	73
3. Pemodelan Laminasi Komposit .....	75
4. <i>Boundary Condition</i> .....	79
5. Uji Konvergensi .....	80
3.10 Verifikasi.....	81
3.10.1 <i>Rules of Mixtures</i> .....	81
3.10.2 <i>Blade Element Momentum Theory</i> .....	83
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	93
4.1 Perhitungan Geometri Perancangan Bilah.....	93
4.2 Analisis Performa Bilah.....	98
4.2.1 Torsi terhadap Kecepatan Putar .....	99
4.2.2 Daya terhadap Kecepatan Putar .....	99
4.2.3 Coefficient Power terhadap Tip Speed Ratio .....	100
4.3 Hasil Simulasi Kekuatan Struktur Material .....	101
4.3.1 Total Deformasi terhadap Variasi Sudut Orientasi Komposit.....	101
4.3.2 Tegangan von-Mises terhadap Variasi Sudut Orientasi Komposit .....	106
4.3.3 Nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu terhadap Variasi Sudut Orientasi Komposit .....	109
4.3.4 <i>Safety Factor</i> terhadap Variasi Sudut Orientasi Komposit .....	113
4.4 Pemetaan Distribusi Nilai Tegangan von-Mises pada Setiap Layer .....	116
4.5 Pemetaan Distribusi Nilai Safety Factor pada Setiap Layer .....	119
4.5.1 Tren Pertama untuk Sudut Orientasi $\pm 35^{\circ}2$ , $\pm 45^{\circ}2$ , dan $\pm 55^{\circ}2$ .....	120
4.5.2 Tren Kedua untuk Sudut Orientasi $\pm 35^{\circ}2s$ , $\pm 45^{\circ}2s$ , dan $\pm 55^{\circ}2s$ .....	121

4.5.3 Tren Ketiga untuk Sudut Orientasi $[90^\circ/0^\circ]_2$ .....	122
4.5.4 Tren Keempat untuk Sudut Orientasi $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$ .....	123
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	125
5.1 Kesimpulan .....	125
5.2 Saran .....	125
DAFTAR PUSTAKA.....	127
LAMPIRAN .....	131
BIODATA PENULIS.....	140

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Profil Kecepatan Angin Melewati Turbin Angin .....	6
Gambar 2. 2 Ekstraksi Energi pada Turbin Angin .....	7
Gambar 2. 3 Turbin Angin <i>Downwind</i> dan <i>Upwind</i> .....	8
Gambar 2. 4 Komponen dari Turbin Angin .....	10
Gambar 2. 5 Beberapa Jenis VAWT .....	11
Gambar 2. 6 Struktur <i>Airfoil</i> dan Bagian-Bagiannya .....	12
Gambar 2. 7 Macam-Macam Bentuk Bilah Turbin Angin .....	12
Gambar 2. 8 Gaya-Gaya yang Bekerja pada Turbin Angin .....	14
Gambar 2. 9 Grafik Perbandingan TSR dan CP pada Turbin Angin .....	15
Gambar 2. 10 Hubungan (a) Profil <i>Blade Element</i> dengan (b) Profil Sudut Serang, Kecepatan, dan Gaya.....	17
Gambar 2. 11 Representasi Skematis dari Komposit .....	19
Gambar 2. 12 Komposit partikel .....	19
Gambar 2. 13 Komposit serpih.....	19
Gambar 2. 14 Laminat composite .....	20
Gambar 2. 15 Continous fiber composite .....	20
Gambar 2. 16 Woven fiber composite.....	20
Gambar 2. 17 Aligned discontinous fiber.....	21
Gambar 2. 18 Off-axis discintinous fiber .....	21
Gambar 2. 19 Randomly oriented discontinous fiber.....	21
Gambar 2. 20 Hybrid fiber composite .....	21
Gambar 2. 21 Klasifikasi Jenis Serat Alam.....	22
Gambar 2. 22 Tanaman Sisal.....	23
Gambar 2. 23 Ladang Budidaya Sisal di Sumbawa .....	23
Gambar 2. 24 Serat Sisal .....	24
Gambar 2. 25 Model Komposit <i>Unidirectional</i> dengan pemodelan geometri <i>Hexagonal</i> .....	25
Gambar 2. 26 Lamina dengan Sistem Koordinat Material Utama .....	27
Gambar 2. 27 Uji Konvergensi Hasil FEM .....	31
Gambar 2. 28 Batasan daerah <i>viscous sub-layer</i> , <i>buffer layer</i> , dan <i>log-law region</i> .....	33
Gambar 2. 29 Skematik <i>1-way Fluid Structure Interaction</i> .....	36
Gambar 2. 30 <i>Layout aerodynamic dan structural coupling</i> .....	36
Gambar 2. 31 Modul Qblade .....	37
Gambar 2. 32 Perbandingan nilai $C_l/C_d$ terhadap Alpha pada Beberapa <i>Airfoil</i> .....	37
Gambar 2. 33 Pemodelan 3D CAD Geometri Bilah Turbin Angin yang Dirancang .....	38
Gambar 2. 34 Grafik nilai <i>Thrust</i> Bilah Turbin Angin terhadap Kecepatan Putar.....	39
Gambar 2. 35 Hasil Simulasi Nilai <i>Equivalent Stress</i> dengan 3 Variasi Pembebanan (a) Beban 1 (b) Beban 2 (c) Beban 3.....	39
Gambar 2. 36 Hasil Simulasi <i>Safety Factor</i> dengan 3 Variasi Pembebanan.....	40
Gambar 2. 37 Kondisi kayu Pinus Sebelum (a) dan Sesudah (b) Pemasangan.....	41
Gambar 2. 38 Kondisi Kayu Mahoni Sebelum (a) dan Sesudah (b) Pemasangan .....	41
Gambar 2. 39 Hasil Pengolahan Data Kayu Pinus .....	42
Gambar 2. 40 Hasil Pengolahan Data Kayu Mahoni.....	42
Gambar 2. 41 <i>Domain Stream Tube</i> dan <i>Boundary Conditions</i> pada pemodelan CFD .....	43
Gambar 2. 42 Hasil Simulasi CFD dan Jumlah Noda pada Setiap Ukuran <i>Mesh</i> .....	43

Gambar 2. 43 <i>Material Properties</i> Turbin Angin 1,5 MW WindPACT.....	44
Gambar 2. 44 Skematik FSI <i>one-way coupling</i> .....	44
Gambar 2. 45 Defleksi bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s.....	45
Gambar 2. 46 Distribusi tegangan normal bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s .....	45
Gambar 2. 47 Distribusi tekanan pada bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s .....	46
Gambar 2. 48 Fraksi Volume dari Masing-Masing Komposit.....	47
Gambar 2. 49 Gambar Sifat komposit serat sisal- <i>polyester</i> dan serat sisal- <i>epoxy</i> baik dengan <i>treatment</i> maupun tanpa <i>treatment</i> .....	47
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	49
Gambar 3. 2 Diagram Alir Perancangan Geometri Bilah Turbin Angin .....	51
Gambar 3. 3 Pemodelan beberapa <i>airfoil</i> yang akan dianalisis .....	52
Gambar 3. 4 Grafik Analisis Perbandingan $C_l/C_d$ terhadap nilai Alpha pada <i>X-FOIL</i> .....	52
Gambar 3. 5 Proses Penginputan Parameter pada <i>Software Q-Blade</i> .....	55
Gambar 3. 6 3D CAD Bilah Turbin Angin dengan Menggunakan <i>Software Q-Blade</i> (a) tampak atas (b) tampak isometrik .....	56
Gambar 3.7 Data Koordinat yang didapatkan dari hasil Impor <i>Software Q-blade</i> ke Excel ...	56
Gambar 3. 8 Geometri 3D CAD Menggunakan <i>Software Solidworks</i> .....	57
Gambar 3. 9 Diagram Alir Perancangan Struktur dan Simulasi Kekuatan Struktur Bilah Turbin.....	58
Gambar 3. 10 <i>Workflow</i> Pemodelan Numerik Simulasi Kekuatan Struktur Bilah Turbin .....	59
Gambar 3. 11 Pemodelan Domain <i>Stream Tube</i> .....	60
Gambar 3. 12 <i>Mesh</i> pada permukaan Bilah Turbin Angin .....	61
Gambar 3. 13 <i>Mesh</i> pada permukaan Domain Fluida.....	61
Gambar 3. 14 Karakter <i>incompressible</i> dan <i>compressible flows</i> .....	64
Gambar 3. 15 Grafik <i>Scaled Residuals</i> dengan Jumlah Iterasi 1800 .....	64
Gambar 3. 16 Grafik <i>Grid Independence Test</i> .....	65
Gambar 3. 17 Distribusi Nilai $Y^+$ pada Bilah Turbin Bagian (a) Sisi <i>Pressure</i> (b) Sisi <i>Suction</i> .....	66
Gambar 3. 18 Nilai Rata-Rata Wall $Y^+$ .....	66
Gambar 3. 19 Gambar Distribusi Tekanan pada Bilah Turbin Bagian (a) <i>Pressure</i> (b) <i>Suction</i> .....	67
Gambar 3. 20 <i>Stacking sequence</i> untuk masing-masing variasi orientasi sudut komposit (a) $\pm 35^\circ/2$ (b) $\pm 45^\circ/2$ (c) $\pm 55^\circ/2$ (d) $90^\circ/0^\circ/2$ (e) $\pm 35^\circ/2s$ (f) $\pm 45^\circ/2s$ (g) $\pm 55^\circ/2s$ (h) $90^\circ/0^\circ/2s$ .....	69
Gambar 3. 21 Penginputan <i>Material Properties</i> Serat Sisal.....	70
Gambar 3. 22 Penginputan <i>Material Properties</i> Resin <i>Epoxy</i> .....	70
Gambar 3. 23 Model Mikrostruktur <i>unidirectional</i> Serat Sisal- <i>Epoxy</i> .....	71
Gambar 3. 24 Nilai <i>Material Properties unidirectional</i> sisal- <i>epoxy</i> dari <i>Material Designer</i> ..	71
Gambar 3. 25 Hasil <i>meshing surface</i> bilah turbin Angin bagian <i>suction</i> (a) dan <i>pressure</i> (b).....	74
Gambar 3. 26 Hasil <i>Mesh Quality</i> bilah turbin angin <i>Skewness</i> (a) & <i>Orthogonal</i> (b) .....	74
Gambar 3. 27 Spektrum <i>Mesh Quality Orthogonal</i> .....	74
Gambar 3. 28 Spektrum <i>Mesh Quality Skewness</i> .....	75

Gambar 3. 29 Penginputan Nilai Ketebalan Lamina pada <i>Fabric Properties</i> .....	75
Gambar 3. 30 Pengaturan Jumlah <i>Stackup</i> dan Orientasi Sudut Serat .....	76
Gambar 3. 31 <i>Element Sets</i> Pada Bagian <i>Pressure</i> Bilah.....	76
Gambar 3. 32 <i>Element Sets</i> Pada Bagian <i>Suction</i> Bilah .....	77
Gambar 3. 33 <i>Element Sets</i> Pada Bagian <i>Tip</i> Bilah.....	77
Gambar 3. 34 Penentuan Sumbu <i>Rosettes</i> pada sisi <i>Suction</i> Bilah Turbin .....	77
Gambar 3. 35 Penentuan Sumbu <i>Rosettes</i> pada sisi <i>Suction</i> Bilah Turbin .....	78
Gambar 3. 36 Penentuan arah <i>Oriented Selection Sets</i> (OSS) Pada Bagian (a) Depan (b) Belakang (c) Tip Bilah Turbin Angin.....	78
Gambar 3. 37 <i>Modelling Group</i> dari Komposit .....	79
Gambar 3. 38 Hasil Pemodelan Laminasi Komposit pada ACP (Pre) .....	79
Gambar 3. 39 <i>Boundary Condition</i> pada Simulasi Kekuatan Struktur Material Bilah Turbin .....	80
Gambar 3. 40 Grafik Uji Konvergensi .....	81
Gambar 3. 41 Grafik $C_L/\alpha$ (a) dan $C_D/\alpha$ (b) dari tiap elemen.....	84
Gambar 3. 42 Pemodelan gaya (a) <i>Normal</i> pada bidang XZ (b) <i>Thrust</i> pada bidang YZ dari bilah turbin dalam sebuah <i>beam</i> .....	87
Gambar 3. 43 Peletakan Titik Support dalam Mengetahui Force dan Moment Reaction.....	89
Gambar 3. 44 Nilai gaya aksial reaksi (a) Sumbu-X (b) Sumbu-Y (c) Sumbu-Z dan gaya momen reaksi (d) Sumbu-X (e) Sumbu-Y hasil simulasi .....	90
Gambar 4. 1 Grafik Linearisasi <i>Twist Angle</i> .....	96
Gambar 4. 2 Grafik Linearisasi <i>Chord</i> .....	96
Gambar 4. 3 Gambar Teknik 2D Bilah Turbin Angin TSD-500.....	97
Gambar 4. 4 Gambar Teknik 2D Pangkal Bilah Turbin Angin TSD-500.....	97
Gambar 4. 5 Jarak antar-elemen pada Bilah.....	98
Gambar 4. 6 Parameter Tiap Elemen Bilah.....	98
Gambar 4. 7 Grafik Torsi terhadap Kecepatan Putar .....	99
Gambar 4. 8 Grafik Daya terhadap Kecepatan Putar .....	100
Gambar 4. 9 Grafik <i>Coefficient Power</i> terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> .....	101
Gambar 4. 10 Hasil Simulasi Nilai Total Deformasi dengan Sudut Orientasi (a) $\pm 35^\circ$ (b) $\pm 45^\circ$ (c) $\pm 55^\circ$ (d) $90^\circ/0^\circ$ (e) $\pm 35^\circ 2s$ (f) $\pm 45^\circ 2s$ (g) $\pm 55^\circ 2s$ (h) $90^\circ/0^\circ 2s$ .....	102
Gambar 4. 11 <i>Chart</i> Hasil Simulasi Deformasi Total Terhadap Variasi Orientasi Sudut Serat .....	103
Gambar 4. 12 Hasil Simulasi Nilai Tegangan von-Mises dengan Sudut Orientasi (a) $\pm 35^\circ$ (b) $\pm 45^\circ$ (c) $\pm 55^\circ$ (d) $90^\circ/0^\circ$ (e) $\pm 35^\circ 2s$ (f) $\pm 45^\circ 2s$ (g) $\pm 55^\circ 2s$ (h) $90^\circ/0^\circ 2s$ .....	108
Gambar 4. 13 <i>Chart</i> Hasil Simulasi Tegangan Von-Mises terhadap Variasi Sudut Orientasi Serat.....	108
Gambar 4. 14 Hasil Simulasi Nilai Kegagalan Tsai-Wu dengan Sudut Orientasi (a) $\pm 35^\circ$ (b) $\pm 45^\circ$ (c) $\pm 55^\circ$ (d) $90^\circ/0^\circ$ (e) $\pm 35^\circ 2s$ (f) $\pm 45^\circ 2s$ (g) $\pm 55^\circ 2s$ (h) $90^\circ/0^\circ 2s$ .....	111
Gambar 4. 15 <i>Chart</i> Hasil Simulasi Nilai Kegagalan Tsai-Wu terhadap Variasi Orientasi Sudut Serat.....	112
Gambar 4. 16 Hasil Simulasi Nilai <i>Safety Factor</i> dengan Sudut Orientasi (a) $\pm 35^\circ$ (b) $\pm 45^\circ$ (c) $\pm 55^\circ$ (d) $90^\circ/0^\circ$ (e) $\pm 35^\circ 2s$ (f) $\pm 45^\circ 2s$ (g) $\pm 55^\circ 2s$ (h) $90^\circ/0^\circ 2s$ .....	115
Gambar 4. 17 <i>Chart</i> Hasil Simulasi Nilai <i>Safety Factor</i> terhadap Variasi Orientasi Sudut Serat .....	115

Gambar 4. 18 Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit $\pm 35^\circ 2s$ .....	117
Gambar 4. 19 Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer (a) 1 (b) 2 (c) 3 (d) 4 Bagian <i>Suction</i> Bilah untuk Variasi Sudut Orientasi $\pm 35^\circ 2s$ .....	118
Gambar 4. 20 Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer (a) 1 (b) 2 (c) 3 (d) 4 Bagian <i>Pressure</i> Bilah untuk Variasi Sudut Orientasi $\pm 35^\circ 2s$ .....	118
Gambar 4. 21 Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit $\pm 35^\circ 2$ .....	120
Gambar 4. 22 Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit $\pm 35^\circ 2s$ .....	121
Gambar 4. 23 Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit $[90^\circ/0^\circ]_2$ .....	122
Gambar 4. 24 Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$ .....	123

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi dari Turbin Angin TSD-500.....	16
Tabel 2. 2 Komparasi sifat mekanik dari serat Alam .....	22
Tabel 2. 3 <i>Material Properties</i> dari Serat Sisal (Kusumastuti, 2009) <sup>(1)</sup> (Rouway, 2020) <sup>(2)</sup> (Acosta-Calderon, Gordillo-Silva, & Garcia-Troncoso, 2021) <sup>(3)</sup> .....	24
Tabel 2. 4 <i>Material Properties</i> dari Matriks <i>Epoxy</i> (AnsysR2, 2020) .....	24
Tabel 2. 5 Parameter Perancangan Geometri Bilah Turbin Angin.....	38
Tabel 3. 1 <i>Material Properties</i> Serat Sisal .....	50
Tabel 3. 2 <i>Material Properties</i> Resin <i>Epoxy</i> .....	50
Tabel 3. 3 Parameter Pertama dalam Perancangan Bilah Turbin Angin.....	53
Tabel 3. 4 Parameter Kedua dalam Perancangan Bilah Turbin Angin.....	54
Tabel 3. 5 Parameter Ketiga dalam Perancangan Bilah Turbin Angin .....	54
Tabel 3. 6 Perhitungan <i>Reynold Number</i> pada Seluruh Elemen Bilah Turbin Angin.....	62
Tabel 3. 7 Iterasi yang Dilakukan dalam Uji Konvergensi .....	65
Tabel 3. 8 Variasi Orientasi Sudut Komposit.....	68
Tabel 3. 9 <i>Material Properties</i> dari komposit <i>unidirectional sisal-epoxy</i> .....	73
Tabel 3. 10 Iterasi yang Dilakukan dalam Uji Konvergensi .....	80
Tabel 3. 11 Nilai bilangan <i>Reynold</i> dan <i>Angle of Attack</i> pada tiap <i>Blade Element</i> .....	83
Tabel 3. 12 Nilai <i>Cl</i> dan <i>Cd</i> pada Setiap Elemen Bilah .....	85
Tabel 3. 13 Hasil Kalkulasi Gaya Aksial dan Torsi pada tiap Elemen Bilah.....	86
Tabel 4. 1 Hasil Perancangan Parameter Pertama.....	93
Tabel 4. 2 Hasil Perancangan Parameter Kedua.....	94
Tabel 4. 3 Hasil Perancangan Parameter Ketiga .....	95
Tabel 4. 4 Hasil Perancangan Geometri Bilah .....	96
Tabel 4. 5 Hasil Simulasi Nilai Total Deformasi pada Setiap Variasi Orientasi Sudut Serat	102
Tabel 4. 6 Hasil Simulasi Nilai Tegangan von-Mises pada Setiap Variasi Orientasi Sudut Komposit .....	108
Tabel 4. 7 Hasil Simulasi Nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu pada Setiap Variasi Orientasi Sudut Komposit.....	111
Tabel 4. 8 Hasil Simulasi Nilai <i>Safety Factor</i> pada Setiap Variasi Orientasi Sudut Komposit .....	115
Tabel 4. 9 Hasil Distribusi Nilai Maksimum Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Semua Variasi Sudut Orientasi Komposit.....	116
Tabel 4. 10 Hasil Distribusi Nilai Minimum <i>Safety Factor</i> pada Setiap Layer untuk Semua Variasi Sudut Orientasi Komposit.....	119

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi merupakan suatu kebutuhan yang tidak akan terpisahkan dari kehidupan manusia, terlebih dalam era modern seperti saat ini. Penggunaan sumber energi di dunia hingga saat ini masih bergantung pada sumber energi tak terbarukan yang berasal dari sumber daya energi fosil, sedangkan fosil memiliki jumlah yang sangat terbatas dan lama kelamaan akan habis. Disisi lain, semakin maju zaman akan menyebabkan peningkatan kebutuhan manusia akan energi pula. Semakin tingginya penggunaan energi fosil akan menyebabkan ancaman bagi alam dan manusia pada masa yang akan datang. Oleh sebab itu, diperlukan suatu upaya pemanfaatan sumber energi alternatif yang dapat diproduksi kembali melalui proses alam. Energi tersebut dikenal sebagai energi terbarukan yang meliputi air, biogas, cahaya matahari, biomassa, *geothermal*, dan gelombang laut. Salah satu potensi energi terbarukan yang sedang berkembang dengan pesat pada era saat ini adalah energi angin.

Indonesia memiliki potensi angin dengan kecepatan angin rata-rata berkisar antara 3-5 m/s dan mampu menghasilkan total daya hingga 9290 MW. Namun, pemanfaatan energi angin di Indonesia hanya mencapai 1%, padahal ketersediaan energi angin sangat melimpah (Fachri & Hendrayana, 2017). Berdasarkan Peraturan Pemerintah No.79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit adalah 23% dan 31% pada tahun 2050. Target kapasitas pembangkit listrik tenaga angin pada tahun 2025 adalah 255 MW sementara hingga tahun 2020 PLTA yang baru terpasang sekitar 135 MW dengan perincian 75 MW di daerah Sidrap dan sebesar 60 MW di daerah Jeneponto (P3TKEBT, 2021). Berdasarkan hal ini, pengembangan energi angin di Indonesia masih menjadi tantangan nasional. Oleh karena itu, pemanfaatan energi angin harus ditingkatkan dengan salah satunya adalah melalui pengembangan turbin angin. Pada turbin angin, tentunya dibutuhkan perancangan bilah turbin angin yang sesuai dengan kondisi angin di Indonesia. Pada literatur ini, penulis memilih tempat yaitu Lentera Bumi Nusantara yang memiliki kecepatan angin 7-17 m/s sebagai lokasi pemasangan turbin angin. (Inayah, Modul Pengenalan Turbin Angin Skala Mikro Lentera Bumi Nusantara, 2020)

Dalam perancangan bilah turbin angin tentunya harus memperhatikan faktor keamanan sebelum diimplementasikan di lapangan. Hal ini dikarenakan angin memberikan tekanan pada bilah turbin sehingga bilah turbin dapat mengalami kegagalan. (Dahlan, 2016) melakukan penelitian dalam perancangan bilah *taperless* berbahan kayu mahoni dan pinus tanpa melakukan analisis kekuatan struktur terlebih dahulu sehingga berdasarkan hasil pengujian di lapangan, bilah berbahan kayu mahoni mengalami keretakan. Selanjutnya, (Gibran, Safhire, & Warits, 2016) melakukan penelitian turbin angin *HAWT* dengan jenis bilah *taperless* berbahan kayu pinus serta melakukan analisis kekuatan struktur pada material bilah dengan menggunakan *software SolidWorks* dan metode *Finite Elemen Methode (FEM)*. Hasil dari penelitiannya menjelaskan bahwa bilah yang dirancang memiliki nilai *Factor of Safety (FOS)* yang baik, yaitu sebesar 5,43 sehingga bilah tersebut layak untuk digunakan. Lalu (Dirgantini, 2021) melakukan simulasi kekuatan struktur pada bilah *inverse taper* bermaterial kayu pinus dengan menggunakan tiga variasi pembebanan, yakni 53,6135 N ; 271,2 N ; dan 356,94 N. Jika menggunakan beban pertama dan kedua menghasilkan nilai *Factor of Safety (FOS)* sebesar 6,3 dan 1,3. Sedangkan pada beban ketiga 356,94 N menghasilkan nilai FOS sebesar 0,95. Berdasarkan hasil simulasi ini menjelaskan bahwa pada pembebanan 356,94, bilah dengan jenis *inverse taper* bermaterial kayu pinus tidak layak diimplementasikan di lapangan.

Serat alam merupakan alternatif *reinforcement* komposit untuk berbagai komposit polimer karena memiliki keunggulan dibanding serat sintetis. Serat alam mudah didapatkan dengan harga yang murah, mudah diproses, densitasnya rendah, ramah lingkungan, dan dapat diuraikan secara biologi. Pemanfaatan serat alam sebagai *reinforcement* komposit telah diaplikasikan di berbagai bidang otomotif dan konstruksi. Di antara berbagai jenis serat alam, sisal merupakan salah satu tanaman yang paling banyak digunakan. Hal ini dikarenakan harga serat sisal sangat murah dibandingkan serat sintetis, yaitu 0,36 US\$/kg. Harga tersebut hanya sepersembilan harga serat gelas yang mencapai 3,25 US\$/kg, serta seperlimaratus harga serat karbon yang mencapai 500US\$/kg (Li & Mai, 2000). Kemudian, (Towo & Ansell, 2008) mengkaji tentang komposit sisal-*polyester* dan sisal-*epoxy*. Didapatkan hasil bahwa sisal-*polyester* tanpa *treatment* memiliki kekuatan tarik sebesar 222.5 MPa, sisal-*polyester* dengan *treatment* memiliki kekuatan tarik sebesar 286.0 MPa, sisal-*epoxy* tanpa *treatment* memiliki kekuatan tarik sebesar 329,8 MPa, dan serat sisal-*epoxy* dengan *treatment* memiliki kekuatan tarik sebesar 335,4 MPa.

Berdasarkan penjelasan yang telah dipaparkan, penulis tertarik untuk melakukan penelitian mengenai rancangan struktural bilah turbin angin yang kuat terhadap kecepatan angin kencang yang ada di Lentera Bumi Nusantara, yaitu 17 m/s. Bilah yang akan dirancang pada penelitian ini adalah bilah dengan jenis *taper* dan memiliki desain geometri ujung pangkal yang sesuai dengan turbin angin skala mikro TSD-500. Guna mengetahui rancangan struktural bilah turbin angin yang kuat terhadap kondisi beban operasional, maka pada penelitian ini akan dilakukan uji simulasi kekuatan struktur material bilah turbin. Simulasi kekuatan struktur bilah turbin ini dilakukan dengan menggunakan Ansys 2020 dengan basis metode Rotating Frame pada Ansys Fluent dan metode Finite Element (FEM) pada Ansys Static Structural serta menggunakan Ansys ACP Pre dalam pembuatan laminasi komposit.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat rumusan masalah, yaitu:

1. Bagaimana merancang geometri bilah tipe *taper* dan performa hasil rancangannya pada turbin angin TSD-500 ?
2. Bagaimana kekuatan struktur bilah tipe *taper* pada turbin angin TSD-500 pada kondisi beban operasional maksimum di Lentera Bumi Nusantara dengan beberapa variasi arah orientasi sudut komposit ?

## 1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat Batasan masalah yang perlu diperhatikan dan diaplikasikan, yaitu:

1. Parameter desain ujung pangkal bilah menyesuaikan dengan spesifikasi turbin angin TSD-500
2. Properti material yang dipakai menggunakan properti yang telah didapat melalui studi literatur dan ANSYS *Engineering Data*.
3. Kecepatan angin yang digunakan dalam pembebanan bilah turbin angin adalah 17 m/s.
4. Komposit yang akan digunakan untuk pelapisan adalah serat sisal yang berasal dari tumbuhan *Agave sisalana* dengan matriks resin *epoxy*
5. Fraksi *volume fiber* yang digunakan sebesar 0,7 dan *volume* matriks yang digunakan sebesar 0,3
6. Jenis komposit yang digunakan adalah RVE model *unidirectional*
7. Variasi sudut orientasi tumpukan laminasi komposit yang digunakan adalah  $[\pm 35^\circ]_2$ ,  $[\pm 35^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 45^\circ]_2$ ,  $[\pm 45^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 55^\circ]_2$ ,  $[\pm 55^\circ]_{2s}$ ,  $[90^\circ/0^\circ]_2$ , dan  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$

8. Ketebalan laminasi komposit yang digunakan adalah 2 mm pada sisi bagian *pressure* dan 2 mm pada sisi bagian *suction* bilah turbin angin.
9. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS R2 2021, Solidworks 2018, dan Qblade v.0963

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tujuan yang ingin dicapai, yaitu:

1. Merancang geometri bilah tipe *taper* dan mengetahui performa hasil rancangannya pada turbin angin TSD-500.
2. Mengetahui kekuatan struktur bilah *taper* pada turbin angin TSD-500 pada kondisi beban operasional maksimum di Lentera Bumi Nusantara dengan beberapa variasi orientasi arah sudut.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Dalam penelitian ini terdapat beberapa manfaat yang diharapkan, yaitu:

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi dalam perancangan bilah turbin angin dengan skala mikro.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi metode bagi Lentera Bumi Nusantara untuk meningkatkan kekuatan struktur bilah turbin angin dengan skala mikro.
3. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi dalam uji simulasi yang melibatkan fluida dalam menganalisis kekuatan struktur suatu material.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Dasar Teori

#### 2.1.1 Energi Angin & Teori Betz Element Momentum

##### 1. Energi Angin

Dalam teori Ilmu Fisika, energi merupakan sesuatu yang tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Namun, satu energi dapat diubah menjadi bentuk energi yang lain. Seperti halnya dalam kasus turbin angin, energi angin dirubah menjadi energi kinetik kemudian dirubah lagi menjadi energi listrik. Proses perubahan energi tersebut berlangsung ketika angin menumbuk bilah dari turbin angin yang kemudian menyebabkan bilah rotor dapat berputar. Kemudian, hasil dari putaran tersebut diteruskan kedalam sistem pembangkit tenaga angin sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Secara singkat bahwa, timbulnya energi listrik tersebut dikarenakan angin adalah udara yang memiliki massa dan memiliki kecepatan sehingga dapat dinyatakan sebagai energi kinetik. Energi kinetik pada angin dirumuskan sebagai berikut (Dirgantini, 2021) :

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Jika  $\rho = \frac{m}{V}$ , yang dimana  $\rho$  adalah massa jenis,  $m$  adalah massa, dan  $V$  adalah volume, maka rumus energi kinetik diatas dapat menjadi persamaan sebagai berikut :

$$Ek = \frac{1}{2} \rho V v^2 \dots\dots\dots(2.2)$$

Dikarenakan Volume udara yang mengalir adalah perkalian antara luasan area  $A$  yang dilewati udara selama jarak dan unit waktu tertentu, maka persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

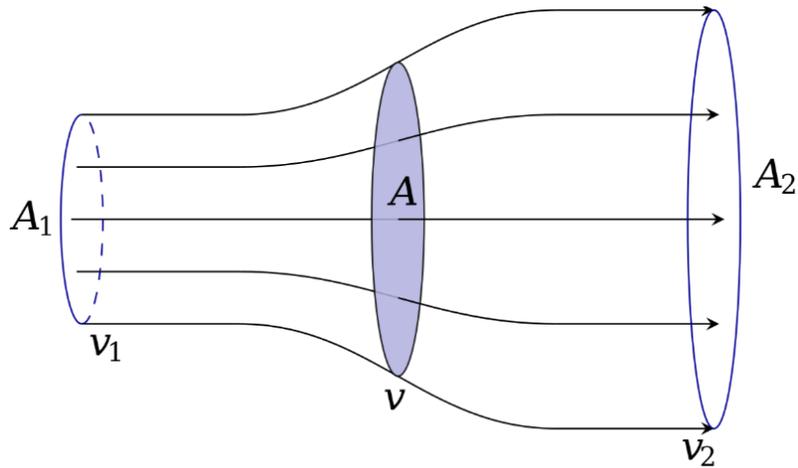
$$V = \frac{A d}{t} \dots\dots\dots(2.3)$$

Maka, daya atau energi angin per satuan waktu dapat menjadi bentuk persamaan sebagai berikut :

$$Ek = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots\dots\dots(2.4)$$

##### 2. Teori Betz Element Momentum

Teori Betz Element Momentum adalah suatu teori yang berdasarkan atas pemodelan dari aliran dua dimensi angin yang mengenai bilah dari turbin angin. Teori ini merupakan teori yang melatarbelakangi perancangan dari turbin angin. Kecepatan dari aliran angin ayng mengenai bilah akan berkurang dan garis aliran akan mengalami pembelokan ketika melewati rotor. Hal ini terjadi dikarenakan sebagian energi kinetik angin akan diserap oleh bilah turbin angin. Putaran rotor akan menghasilkan perubahan kecepatan angin terhadap arah tangensial sehingga menyebabkan berkurangnya jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. (Hidayat, 2019)



**Gambar 2. 1** Profil Kecepatan Angin Melewati Turbin Angin

Untuk mengetahui seberapa besar daya yang dapat diekstrak oleh turbin angin dapat dilakukan dengan menghitung seberapa besar selisih daya angin sebelum dan sesudah melintasi turbin angin sebagaimana yang dimodelkan pada gambar 2.1. Gambar tersebut menjelaskan bahwa kecepatan angin berkurang dikarenakan sebagian energi kinetik diserap oleh turbin angin. Dalam keadaan tersebut, energi kinetik angin diubah menjadi energi rotasional atau daya angin ( $P_{wind}$ ). Kemudian, saat angin melintas sampai pada jarak tertentu dari turbin angin, maka kecepatan angin akan kembali pada kecepatan semula. Maka dari itu, daya angin yang diekstrak oleh turbin angin dapat dirumuskan sebagai berikut (Musyafa, 2012):

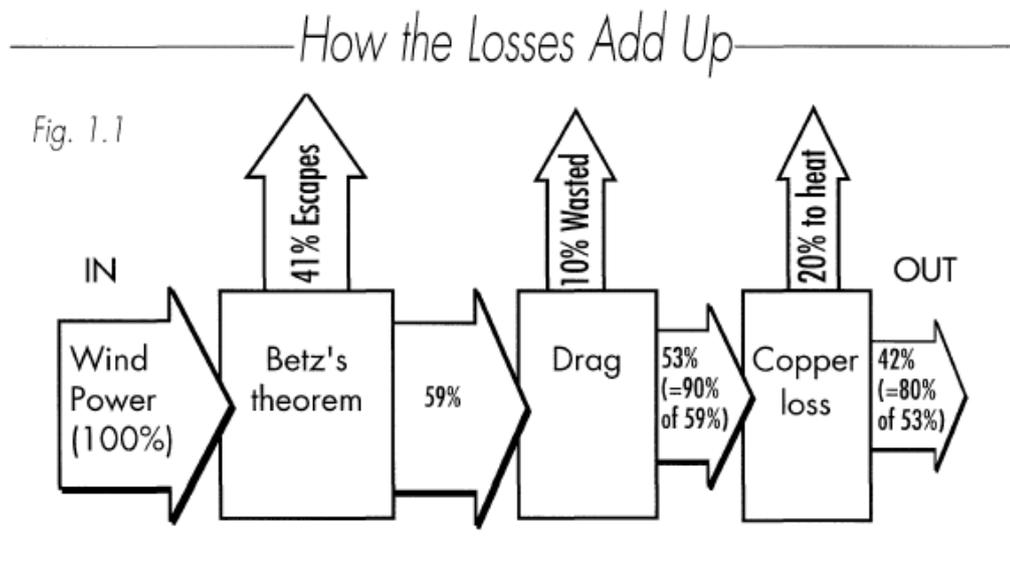
$$P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(A_1V_1^3 - A_2V_2^3) = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{8}{9}A_1V_1^3\right) \dots\dots\dots(2.5)$$

Agar mempermudah perhitungan, maka persamaan 2.5 diubah menjadi bentuk yang lain, yaitu dengan menggunakan variabel  $A_2$  atau terkait dengan luas dari area sapuan turbin angin sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2}\rho_{air}\left[\frac{8}{9}\left(\frac{2}{3}A_2V_1^3\right)\right] = \frac{1}{2}\rho_{air}\left(\frac{16}{27}A_2V_1^3\right) \dots\dots\dots(2.6)$$

Dalam persamaan 2.6 terdapat konstanta 16/27 atau = 0,593. Nilai konstanta inilah yang disebut dengan Koefisien Betz atau biasa dikenal dengan *Betz Limit*. Nilai ini menyatakan efisiensi maksimum dari koefisien performa bilah turbin ( $C_p$ ). Walaupun dalam kenyataannya, mendesain turbin angin dengan nilai  $C_p = 59,3\%$  adalah hal yang sangat sulit. Hal itu dikarenakan besarnya nilai  $C_p$  dipengaruhi oleh beberapa faktor loss energi yang terjadi pada sistem dari turbin angin. Faktor loss energi ini dapat dilihat pada gambar sehingga daya turbin angin dapat dirumuskan sebagai berikut (Piggott, 2011).

$$P_t = C_p \cdot P_{wind} \dots\dots\dots(2.7)$$



**Gambar 2. 2** Ekstraksi Energi pada Turbin Angin

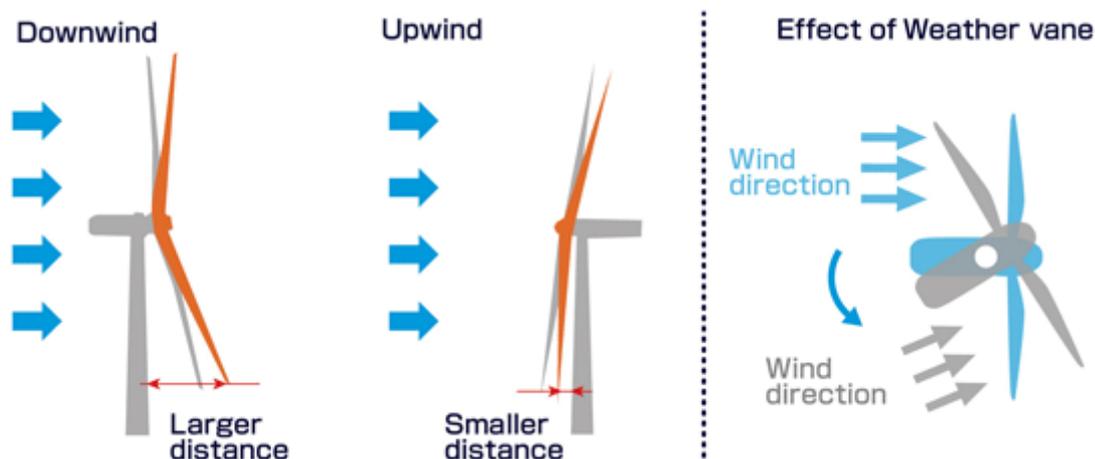
### 2.1.2 Turbin Angin

Turbin angin adalah alat yang mampu mengubah energi angin menjadi energi mekanik yang selanjutnya mampu diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Turbin angin pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi dan biji-bijian, keperluan irigasi, dan lainnya. Cara kerja dari sistem turbin angin cukup sederhana, energi angin yang berhembus akan menubruk permukaan bilah dan akan memutar bilah turbin angin, kemudian diteruskan untuk memutar rotor pada generator dan akan menghasilkan energi listrik. Sebelum energi listrik ini disalurkan, biasanya akan disimpan ke dalam baterai terlebih dahulu sebelum nantinya dapat dimanfaatkan. Hingga saat ini, turbin angin secara umum dibagi menjadi dua macam berdasarkan poros putarnya, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* dan *Vertical Axis Wind Turbine* (Setyawan, 2018).

#### 1. *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)

*Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) adalah turbin yang sumbu rotornya berada pada arah horizontal. Berbeda dengan VAWT, HAWT memiliki kemampuan untuk *self-starting* dan *yawing*. Angin memiliki pengaruh yang besar dalam turbin ini, maka dari itu turbin angin dengan jenis HAWT ini umumnya dioperasikan pada ketinggian yang lebih tinggi daripada VAWT.

HAWT memiliki desain bilah yang mirip dengan propeller. Pada turbin HAWT, shaft rotor dan generator yang terletak pada puncak tower harus diarahkan ke arah angin berhembus. Disamping itu, turbin ini juga menggunakan wind plane yang diletakkan di bagian rotor untuk menggerakkan bilah. Kelebihan dari jenis turbin ini adalah mampu menangkap energi angin lebih maksimal karena letak towernya yang tinggi sehingga energi angin yang terekstrak akan lebih banyak dan efisiensi yang dihasilkan akan lebih tinggi. Turbin angin HAWT terbagi atas dua tipe, yaitu *upwind* dan *downwind*. Perbedaan antara keduanya adalah pada letak penempatan rotor terhadap arah angin. Tipe *upwind* memiliki rotor yang berhadapan dengan angin sedangkan tipe *downwind* memiliki rotor yang ditempatkan dibelakang tower. (Dirgantini, 2021)



**Gambar 2. 3** Turbin Angin *Downwind* dan *Upwind*

Turbin angin jenis HAWT ini memiliki poros utama dan generator yang berada di puncak menara turbin dan turbin jenis HAWT ini harus diarahkan ke arah angin yang berhembus. Pada turbin angin HAWT yang berukuran kecil diarahkan ke arah angin dengan menggunakan bantuan *wind plane* atau *yaw system* yang diletakkan dibagian belakang rotor turbin, sedangkan untuk turbin yang berukuran besar dilengkapi dengan sensor yang terhubung dengan motor servo untuk mengarahkan bilah turbin angin sesuai dengan arah angin. Umumnya turbin angin jenis HAWT ini memiliki *gearbox* yang membantu transmisi saat putaran torsi dari bilah rendah sehingga dapat meningkatkan nilai putaran torsi untuk memutar rotor generator listrik.

Beberapa kelebihan turbin angin jenis HAWT adalah :

- a. Dasar menara yang tinggi sehingga memungkinkan untuk mendapatkan angin yang memiliki kecepatan lebih tinggi
- b. Efisiensi lebih tinggi dikarenakan bilah turbin selalu bergerak tegak lurus terhadap arah angin dan menerima daya sepanjang putaran

Namun, disamping itu turbin angin jenis HAWT memiliki kekurangan jika dibandingkan dengan turbin angin jenis VAWT, yaitu :

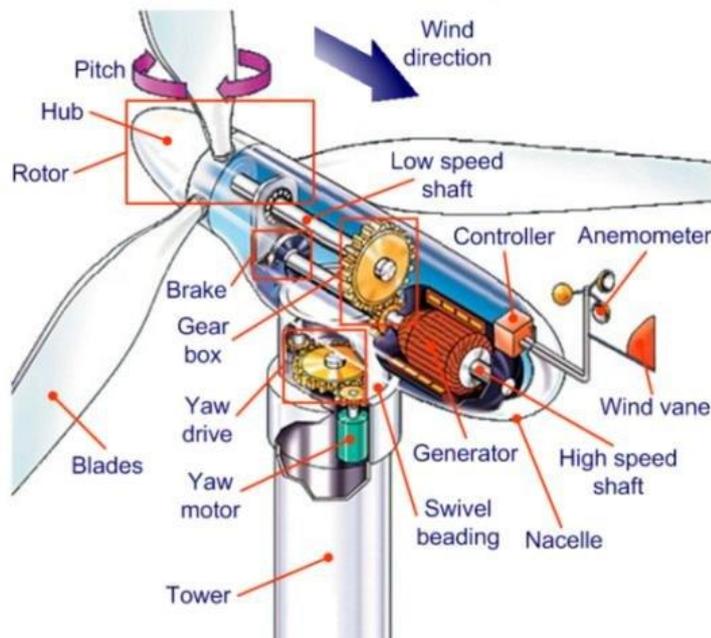
- a. Hampir seluruh letak komponen turbin angin berada di menara puncak sehingga konstruksi menara harus kuat untuk menyangga beban bilah, generator, dan *gearbox* yang berat.
- b. Saat penginstalasian turbin angin, komponen seperti bilah, gearbox, dan generator harus di angkat ke atas menara puncak sehingga proses penginstalasiannya terbilang sulit
- c. Letak bilah turbin angin jenis HAWT cenderung berada di posisi yang tinggi sehingga mengganggu pandangan dan estetika secara umum
- d. Membutuhkan mekanisme kontrol tambahan untuk mengarahkan bilah turbin ke arah angin dengan bantuan *wind plane* atau *yaw* untuk skala mikro dan sensor yang terhubung dengan motor servo untuk turbin angin HAWT yang besar. [Raden]

Turbin angin jenis HAWT terdiri atas beberapa komponen yang dipasang terutama pada bagian atas dari menara puncak. Pada menara turbin angin HAWT, umumnya terdapat tangga yang digunakan untuk mengakses bagian atas turbin atau *nacelle*. Secara umum, komponen utama turbin angin jenis HAWT terdiri dari : rotor (bilah dan *hub*), *nacelle*, generator, transmisi

*gearbox*, kopling, rem, *yaw system*, menara, sistem kontrol. Dibawah ini merupakan penjelasan untuk masing-masing komponen dari turbin angin jenis HAWT adalah :

- a. *Blade* (Bilah)  
Rotor turbin angin terdiri atas bilah/sudu dan *hub* merupakan komponen yang berfungsi untuk menerima energi kinetik dari angin dan merubahnya menjadi energi gerak (mekanik) putar. Jumlah bilah turbin angin jenis HAWT yang biasanya digunakan adalah berjumlah 2,3, dan 4.
- b. *Rotor Hub*  
*Hub* adalah bagian dari rotor yang berfungsi untuk menghubungkan sudu bilah dengan *shaft* poros utama turbin.
- c. *Pitch*  
Tipe salah satu rotor adalah bilahnya terpasang dengan variabel yang dapat dirubah sudutnya. Posisi sudut serang bilah dapat diatur terhadap arah angin bertiup. Mekanisme ini disebut dengan rotor dengan *pitch variable blades*. Namun, tidak semua turbin angin menggunakan rotor dengan sudu *blade* variabel
- d. Generator  
Generator adalah komponen yang paling penting dalam sistem turbin angin. Fungsi dari generator ini adalah untuk merubah energi gerak (mekanik) pada poros penggerak menjadi energi listrik.
- e. *Gearbox*  
Transmisi di turbin angin berfungsi untuk memindahkan daya dari rotor ke generator dengan akselerasi putaran. Transmisi ini diperlukan karena umumnya putaran rotor berotasi pada putaran yang rendah, sedangkan generator bekerja pada putaran tinggi.
- f. Rem  
Rem berfungsi untuk menghentikan putara dari poros rotor. Sebagaimana fungsi rem pada umumnya, rem ini bertujuan untuk keamanan atau pada saat ingin melakukan *maintenance* atau perawatan.
- g. *Low Speed Shaft*  
*Low Speed Shaft* berfungsi untuk memindahkan daya dari rotor ke generator. Pemindahan daya ini dapat secara langsung maupun melalui mekanisme transmisi *gearbox*.
- h. *Yawing System*  
Turbin angin yang relatif besar umumnya sudah menggunakan *yawing system* yang digerakkan oleh motor servo. *Yawing controller* ini berfungsi menerima input dari sensor anemometer dan mendeteksi perubahan arah angin serta memberikan instruksi kepada motor servo untuk membelokkan arah poros turbin angin dan juga memberikan masukan kepada *pitch control*.
- i. Anemometer Sensor  
Anemometer berfungsi untuk mendeteksi kecepatan angin, hal ini sebagai inputan kepada sistem kontrol untuk mengendalikan operasional pada kondisi optimum.
- j. *Tail Vane*  
*Tail Vane* adalah salah satu sistem yang pasif. *Tail Vane* berfungsi untuk membelokkan posisi rotor terhadap arah datangnya angin
- k. *Nacelle*  
*Nacelle* berfungsi untuk menempatkan dan melindungi komponen-komponen turbin angin yang ada didalamnya.

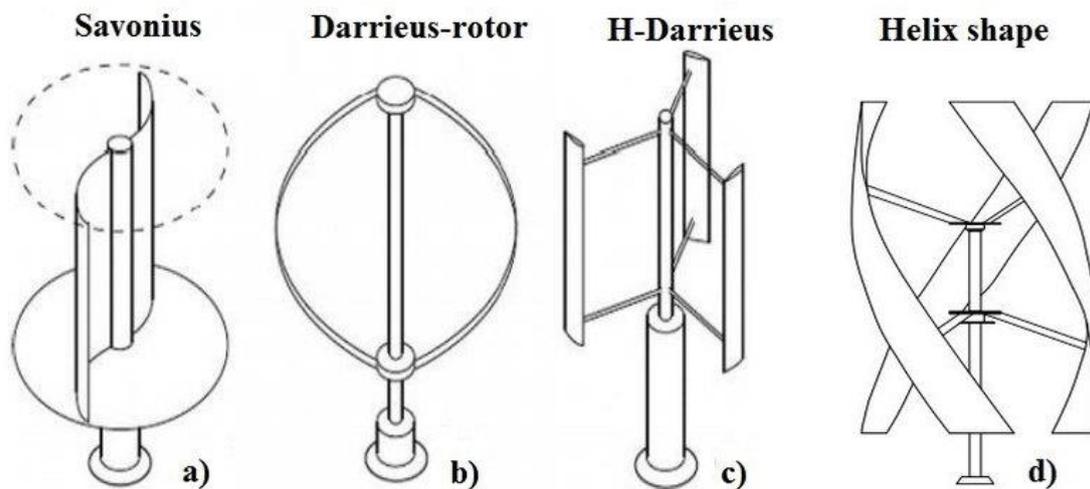
- l. *High Speed Shaft*  
*High Speed Shaft* berfungsi untuk memindahkan atau meneruskan daya dari *gearbox* ke generator
- m. *Yaw System Gearbox*  
*Yaw drive* berfungsi untuk menempatkan komponen turbin angin yang berada di atas menara agar menghadap optimal terhadap arah angin yang bertiup.
- n. Motor Servo (*Yaw motor*)  
 Motor servo berfungsi untuk menggerakkan *yaw drive* untuk memposisikan komponen turbin angin yang berada di atas menara menghadap optimal ke arah angin bertiup.
- o. *Tower* (Menara)  
 Menara adalah tiang penyangga yang berfungsi untuk menopang keeluruhan komponen dari turbin angin yang berada di atasnya.



**Gambar 2. 4** Komponen dari Turbin Angin

## 2. *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*

*Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)* memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap arah angin. Hal yang membedakannya dengan HAWT adalah VAWT tidak harus diarahkan terhadap arah angin berhembus, ini dikarenakan turbin angin VAWT mampu untuk memanfaatkan angin dari berbagai arah. Kelebihan turbin angin VAWT ini sangat berguna untuk penempatan turbin angin di daerah yang arah anginnya bervariasi. Pada turbin angin VAWT, pembuatan menara turbin tidak memerlukan menara yang tinggi sehingga lebih mudah untuk mengakses bagian turbin ketika akan dilakukan *maintenance* atau perbaikan. Hal ini dikarenakan pada turbin angin dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* pada turbin angin VAWT ini dapat ditempatkan di dekat tanah. Oleh karena itu, biaya perawatan jenis turbin angin VAWT ini akan lebih rendah dan efisien. (Setyawan, 2018)



**Gambar 2. 5** Beberapa Jenis VAWT

Beberapa kelebihan yang dimiliki oleh turbin angin jenis VAWT, yaitu :

- Tidak memerlukan mekanisme *yaw* sistem, karena turbin angin VAWT dapat berputar tanpa harus diarahkan ke arah angin yang berhembus
- Turbin angin VAWT dapat diletakkan di dekat permukaan tanah sehingga lebih mudah dalam proses *maintenance* dan perbaikan. Hal ini juga menyebabkan biaya *maintenance* dan perbaikan lebih efisien dan murah
- Turbin angin VAWT memiliki *tip speed ratio* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin angin HAWT sehingga kemungkinan rusak akan lebih kecil jika dibandingkan turbin angin HAWT
- Turbin angin sumbu VAWT dapat ditempatkan di lokasi yang dimana struktur tinggi dilarang karena tidak memerlukan tower penyangga

Namun, disisi lain tentunya turbin angin VAWT memiliki kekurangan jika dibandingkan dengan HAWT, yaitu :

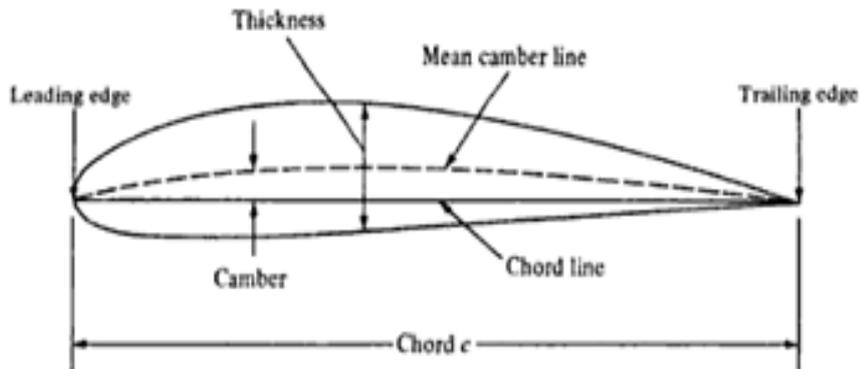
- Turbin angin VAWT memiliki efisiensi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin angin HAWT, hal ini dikarenakan hambatan tambahan yang dimiliki seperti angin yang menabrak bagian belakang dari bilah turbin
- Memiliki posisi dekat dengan permukaan tanah sehingga tidak memanfaatkan kecepatan angin yang tinggi di atas.
- Turbin angin jenis VAWT memiliki torsi awal yang rendah, sehingga dalam implementasinya membutuhkan dorongan eksternal untuk mulai beroperasi dengan menggunakan *speed controller*

### 2.1.3 Bilah Turbin Angin

#### 1. *Airfoil*

*Airfoil* adalah objek yang digunakan dalam perancangan turbin angin, yang dimana apabila aliran fluida melewatinya akan menghasilkan efek aerodinamis berupa gaya angkat atau *Coefficient Lift* (Cl) dan gaya hambat atau *Coefficient Drag* (Cd). *Airfoil* merupakan bentuk desain dari penampang bilah. Terjadinya gaya angkat pada *airfoil* dikarenakan kecepatan aliran fluida pada permukaan bagian atas *airfoil* lebih lambat dibandingkan kecepatan aliran fluida pada permukaan bagian bawah *airfoil*. Oleh karena itu, tekanan pada permukaan bagian atas lebih rendah dibandingkan dengan permukaan bagian bawah *airfoil*. Maka dari itu, aliran itulah

yang akan menyebabkan terjadinya gaya angkat pada *airfoil*. Dari sekian banyak jenis-jenis *airfoil*, *airfoil National Advisory Committee for Aeronautics (NACA)* merupakan salah satu jenis *airfoil* yang paling banyak digunakan. (Dirgantini, 2021)



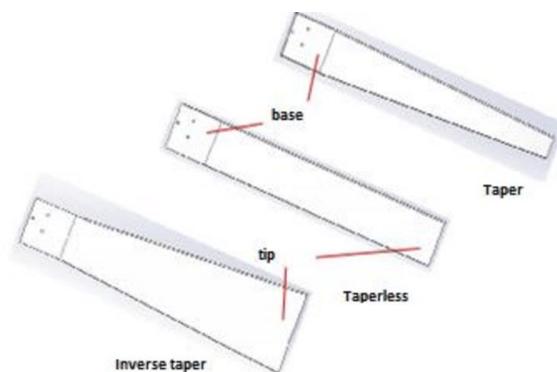
**Gambar 2. 6** Struktur *Airfoil* dan Bagian-Bagiannya

Berdasarkan gambar diatas, ditunjukkan bahwa *airfoil* memiliki bagian-bagian yang diantaranya terdiri dari :

- Leading edge* adalah ujung depan dari *airfoil* atau sayap yang secara umum berbentuk cembung. *Leading edge* juga merupakan titik paling depan dari *airfoil*
- Trailing edge* adalah ujung belakang dari *airfoil* atau sayap yang secara umum berbentuk runcing. *Trailing edge* adalah titik paling belakang dari *airfoil*
- Chord* adalah panjang garis yang ditarik dari *leading edge* ke *trailing edge* sehingga chord adalah jarak antara *leading edge* dan *trailing edge*. Sedangkan *chord line* adalah garis lurus yang menghubungkan antara *leading edge* dengan *trailing edge*.
- Chamber* adalah besarnya jarak antara garis rata-rata *airfoil* atas dan bawah terhadap chord line.
- Thickness* adalah jarak antara permukaan atas dan bawah yang juga tegak lurus terhadap chord Line.

## 2. Jenis-Jenis Bilah Turbin Angin

Secara umum terdapat 3 jenis bentuk bilah turbin angin, yaitu *taperless*, *taper*, dan *inverse-taper*.



**Gambar 2. 7** Macam-Macam Bentuk Bilah Turbin Angin

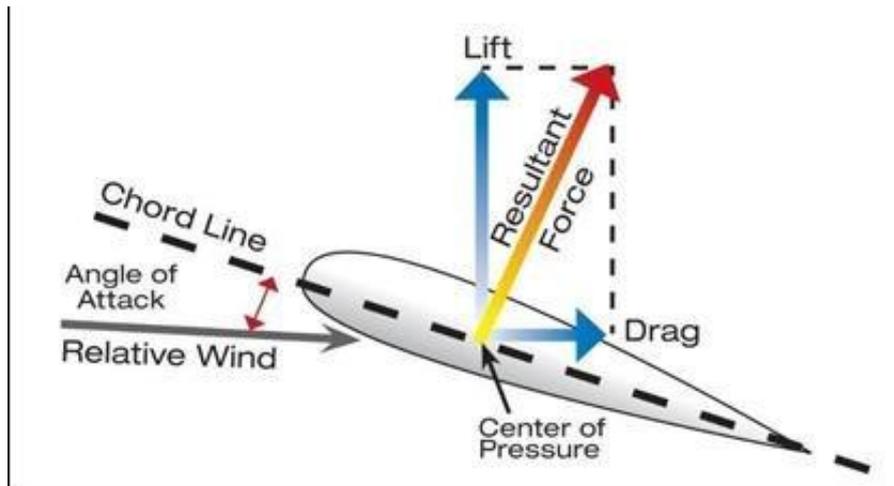
- Taper* adalah jenis bilah yang ukurannya mengecil dari ujung pangkal ke ujung bilah. Jenis bilah ini biasanya digunakan untuk generator yang membutuhkan kecepatan tinggi

dalam menghasilkan energi listrik. Torsi yang dimiliki oleh jenis bilah ini rendah, dikarenakan luas penampang pada ujung yang kecil. Bilah dengan jenis ini juga membutuhkan kecepatan angin yang banyak untuk awal berputar dikarenakan angin yang mengenai bagian ujung dari bilah hanya sedikit. Namun jika bilah ini sudah berputar, maka putarannya akan cenderung meningkat sesuai dengan bertambahnya kecepatan angin. Hal ini terjadi karena penampang/beban di ujung bilah yang kecil sehingga akan memperkecil gaya sentripetal yang terjadi ketika bilah berputar. Semakin besar gaya sentripetal, maka putaran sudu cenderung melambat. Disamping itu, penulis memilih jenis bilah *Taper* dikarenakan kecepatan angin yang berada di sekitar Ciheras terbilang cukup tinggi, yakni berkisar antara 7-17 m/s. (Inayah, Modul Pengenalan Turbin Angin Skala Mikro Lentera Bumi Nusantara, 2020)

- b. *Taperless* adalah jenis bilah yang memiliki torsi yang sedikit lebih besar dari jenis bilah *taper*, karena jenis bilah ini memiliki lebar chord yang sama dari pangkal hingga ujung bilah. Bilah *taperless* lebih awal berputar dibandingkan bilah *taper* karena angin yang mengenai penampang bilah lebih banyak dan merata. Bilah jenis ini tidak cocok untuk putaran tinggi dikarenakan lebar chord yang sama dari pangkal hingga ujung sehingga pada saat putaran yang tinggi seakan-akan memblok energi kinetik angin yang datang mengenainya. Hal ini dapat memperbesar gaya dorong pada bilah sehingga bilah akan mudah patah. (Inayah, Modul Pengenalan Turbin Angin Skala Mikro Lentera Bumi Nusantara, 2020)
- c. *Inverse taper* adalah jenis bilah yang ukuran lebar chordnya membesar dari pangkal ke ujung. Bilah ini merupakan kebalikan dari bilah jenis *taper*. Bilah jenis ini memiliki torsi yang besar dibandingkan kedua jenis bilah sebelumnya dan dapat berputar di angin yang memiliki kecepatan yang rendah. Bilah ini cocok digunakan di wilayah yang potensi anginnya rendah, seperti daerah perkotaan dan pemukiman penduduk/perkampungan. Alasan bilah jenis ini memiliki torsi yang besar dibandingkan dengan kedua jenis bilah lainnya adalah karena bagian penampang bilah ini membesar ke ujung sehingga angin yang mengenai penampang bilah ini lebih banyak. Bilah *inverse taper* ini memiliki putaran yang lambat akan tetapi torsi yang dihasilkannya besar, hal inilah yang membuat bilah *inverse taper* biasanya di beri tambahan *gear box* pada poros utama dari turbin angin dengan perbandingan putaran tertentu. *Gear box* ini diberikan untuk mempercepat putaran pada poros generator yang biasanya memerlukan putaran tinggi untuk menghasilkan listrik. (Inayah, Modul Pengenalan Turbin Angin Skala Mikro Lentera Bumi Nusantara, 2020)

### 3. Gaya-Gaya yang Bekerja pada Turbin Angin

Pada suatu *airfoil* terdapat dua gaya yang terjadi ketika fluida mengalir pada permukaan *airfoil*. Gaya tersebut adalah gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*). Kedua gaya ini dimanfaatkan oleh turbin angin untuk memutar bilah. Terjadinya putaran pada rotor akan menghasilkan kecepatan sudut. Sehingga besarnya kedua gaya tersebut bergantung pada *angle of attack* ( $\alpha$ ).



**Gambar 2. 8** Gaya-Gaya yang Bekerja pada Turbin Angin

- a. Gaya *Lift* dikenal juga sebagai gaya angkat ( $L$ ) adalah gaya yang muncul dalam arah tegak lurus terhadap aliran udara yang disebabkan oleh Efek Bernoulli yang menurunkan tekanan di atas dan menyebabkan kecepatan aliran lebih tinggi pada bagian bawah dan karenanya bagian bawah mengalami tekanan yang lebih rendah. Gaya angkat ( $L$ ) digambarkan oleh  $C_L$  koefisien gaya angkat (Dahlan, 2016):

$$C_L = \frac{\frac{L}{A}}{\frac{1}{2}\rho V^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

- b. Gaya *Drag* dikenal juga sebagai gaya hambat ( $D$ ) adalah gaya yang muncul dalam arah yang sejajar dengan arah gerak aliran udara yang menabrak bilah turbin.

$$C_D = \frac{\frac{D}{A}}{\frac{1}{2}\rho V^2} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dengan  $A$  adalah luas efektif dari *airfoil* ke arah *drag* ( $m^2$ ) dan  $D$  adalah gaya hambat (dalam Newton). Gaya angkat  $L$  dan *drag*  $D$  bervariasi dengan sudut bilah rotor bersamaan arah aliran udara yang ditentukan sebagai angle of attack ( $\alpha$ ).

**2.1.4 Perancangan Bilah Turbin Angin**

Dalam perancangan bilah turbin angin sumbu horizontal (HAWT), terdapat beberapa parameter yang harus diperhatikan. Parameter-parameter yang digunakan tersebut diantaranya (Handoko, 2019):

- a. Panjang Bilah, yaitu parameter yang akan mempengaruhi besarnya daya yang akan dihasilkan turbin angin karena panjang bilah akan menentukan luas dari sapuan bilah.
- b. *Twist* , yaitu sudut puntir pada bilah antara *chord line* dengan bidang rotor.
- c. Koefisien torsi, yaitu parameter yang merepresentasikan besarnya torsi yang akan diproduksi oleh bilah. Koefisien torsi dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

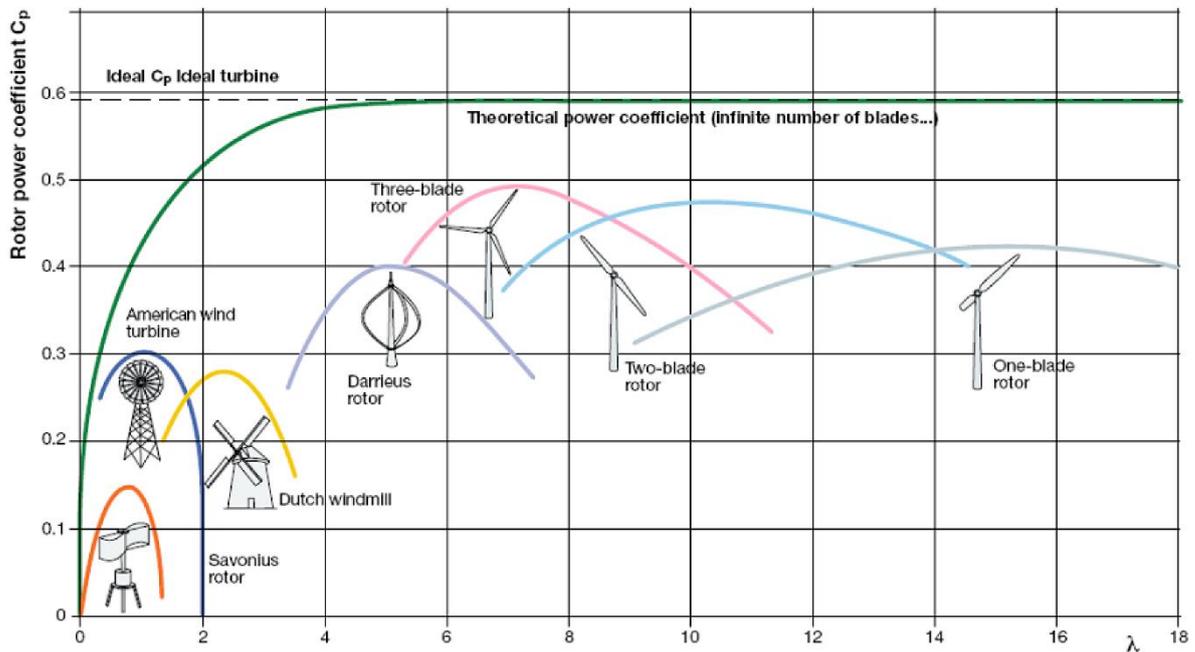
$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \dots\dots\dots(2.11)$$

- d. *Tip Speed Ratio* (TSR), yaitu rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin relatif. Turbin angin mampu beroperasi hanya pada TSR tertentu. Hal ini dikarenakan bilah yang memiliki TSR yang besar akan menyebabkan putaran bilah yang tinggi. Kemudian, jika bilah berputar dengan kecepatan yang tinggi maka akan terjadi

gangguan suara yang lebih kencang. Hal tersebut menunjukkan bahwa turbin angin telah melewati batas optimum dari TSR yang dimilikinya. Oleh karena itu, TSR dapat dihitung dengan perbandingan antara kecepatan rotor dan kecepatan angin yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\pi D N}{60 v} \dots\dots\dots(2.12)$$

- e. Koefisien Performansi ( $C_p$ ), yaitu kinerja bilah dalam menyerap energi angin yang diterimanya. Apabila nilai  $C_p$ -nya besar, maka turbin angin tersebut memiliki kemampuan yang baik dalam mengekstrak energi angin yang diperolehnya menjadi energi listrik.



**Gambar 2. 9** Grafik Perbandingan TSR dan CP pada Turbin Angin

- f. *Rated Speed*, *Cut in Speed*, dan *Cut Out Speed*. Ketiga parameter tersebut merupakan istilah kecepatan angin yang mengenai turbin angin. *Rated Speed* adalah kecepatan angin yang diperlukan turbin untuk menghasilkan daya. *Cut-in speed* adalah kecepatan angin minimum yang diperlukan turbin untuk mulai menghasilkan listrik, sedangkan *cut-out speed* adalah kecepatan angin maksimum turbin angin dapat beroperasi.

### 2.1.5 Turbin Angin TSD-500

Turbin angin skala mikro adalah turbin angin yang didirikan pada luas area berkisar 200m<sup>2</sup> dengan kapasitas energi maksimum yang dihasilkan berkisar 50 kW. Turbin angin skala mikro membutuhkan kecepatan angin rata-rata minimal antara 2,5 m/s hingga 4,5 m/s untuk menghasilkan daya listrik agar dapat digunakan untuk kebutuhan rumahan. Adapun ukuran turbin angin yang dapat digunakan berkisar antara 1 hingga 7,5 meter. (Nongdhar & Goswami, 2018)

TSD-500 adalah spesifikasi turbin angin yang digunakan di Lentera Bumi Nusantara. Turbin angin ini masuk kedalam jenis turbin angin dengan skala mikro. Perbedaan mendasar antara TSD-500 dengan turbin angin lainnya terletak pada generatornya yang memiliki 3 fasa magnet permanen dan memiliki teknologi *cogging-less*. Dengan adanya teknologi *cogging-less*

ini rotor dapat diputar tanpa hambatan dan turbin angin ini mampu berputar pada kecepatan angin yang rendah. Disamping itu, TSD-500 memiliki teknologi *furling* yang memiliki fungsi sebagai sistem pengamanan generator dan baterai. Bila baterai dalam kondisi penuh, maka turbin angin akan secara otomatis berhenti berputar dengan cara menghindari dari arah datangnya angin. Lalu, apabila baterai sudah bisa diisi kembali maka ekor turbin akan mengarahkan kemabli badannya ke arah angin. Oleh karena itulah, turbin ini memiliki nama The Sky Dancer TSD-500. Spesifikasi dari turbin angin TSD-500 adalah sebagaimana yang dijelaskan pada gambar dibawah ini. (Inayah, Modul Pengenalan Turbin Angin Skala Mikro Lentera Bumi Nusantara, 2020)

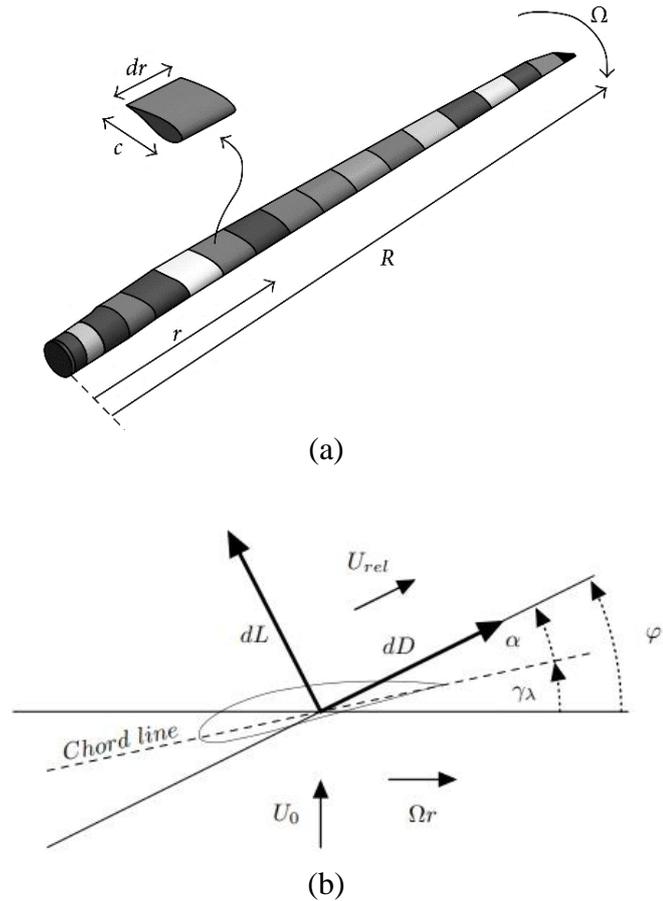
**Tabel 2. 1 Spesifikasi dari Turbin Angin TSD-500**

System Name	TSD-500
Turbine Type	HAWT
Maximum Output Power	500 Watt in 12 m/s above
Start Up Wind Speed	2.5 m/s
Cut In Wind Speed	3 m/s
Survival Wind Speed	33 m/s
Generator Type	3-phase permanent magnet (Cogging-less technology)
Blade Diameter	1 or 2 m
Number of Blades	3 blades
Blade Material	Pinewood
Maximum RPM	1000 RPM
Storage System	24 V
Weight Of System	25 kg
Height of Pole	4 -6 m
Manufactured By	NIDEC Japan Corp.

### 2.1.6 Blade Element Momentum Theory

Teori *Blade Element Momentum* (BEM) adalah model yang digunakan untuk mengevaluasi performa turbin yang mendorong atau mengekstraksi energi kinetik dari angin berdasarkan parameter mekanik dan geometris serta karakteristik aliran yang berinteraksi. Dalam teori ini, bilah turbin didiskritisasi menjadi beberapa bagian/elemen, dan didekatkan sebagai model planar. Pendekatan dengan teori ini menghasilkan gaya-gaya yang bekerja pada masing masing elemen sebagai fungsi dari karakteristik aliran dan geometri bilah.

Satuan yang mendasar dari model ini adalah dua koefisien eksperimental (biasanya dilambangkan oleh  $C_L$  dan  $C_D$ ), yang masing-masing disebut *coefficient of lift* (koefisien angkat) dan *coefficient of drag* (koefisien hambat), yang menjelaskan gaya pada penampang sebagai fungsi *angle of attack* (sudut serang), yaitu sudut relatif antara bilah yang berputar dan aliran fluida. Selanjutnya, hasil yang didapatkan akan diintegrasikan di sepanjang bilah untuk mendapatkan nilai secara menyeluruh (Ledoux, Riffo, & Julien, 2021).



**Gambar 2. 10** Hubungan (a) Profil *Blade Element* dengan (b) Profil Sudut Serang, Kecepatan, dan Gaya

$$dL = C_L(\alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot c_\lambda \cdot dr \dots\dots\dots (2.13)$$

$$dD = C_D(\alpha) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot c_\lambda \cdot dr \dots\dots\dots (2.14)$$

Parameter  $\alpha$  disebut sudut serangan dan didefinisikan sebagai sudut antara *chord* dan arah aliran, karenanya memenuhi hubungan sebagai berikut.

$$\alpha = \varphi - \gamma_\lambda \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana  $-\pi/2 < \gamma_\lambda < \pi/2$  adalah *twist angle* (juga disebut *local pitch*) dari bilah dan  $\varphi$  adalah *flow angle*. Parameter yang terkait dengan *blade element* dirangkum dalam Gambar 2.10(b). Meskipun berubah dari satu profil ke profil lainnya, perilaku  $C_L$  dan  $C_D$  sebagai fungsi  $\alpha$  dapat dijelaskan secara kualitatif secara umum. Koefisien  $C_L$  biasanya meningkat hampir secara linier sehubungan dengan  $\alpha$  hingga  $\alpha$  sudut kritis yang diberikan, dengan  $0 < \alpha_s < \pi/2$ , di mana fenomena (*J. Ledoux, 2021*) *stall* terjadi.  $C_L$  kemudian berkurang dengan cepat, menyebabkan hilangnya *lift* secara tiba-tiba. Untuk  $C_D$  dikaitkan dengan gaya *drag*, selalu positif dan didefinisikan untuk semua sudut. Secara umum, koefisien ini sedikit meningkat dalam  $\alpha$  hingga  $\alpha = \alpha_s$ , dan kemudian menjadi sangat besar. Oleh karena itu, kondisi  $\varphi - \gamma_\lambda < \alpha_s$  selalu diperlukan dalam fase desain bilah.

Terdapat persamaan yang diusulkan oleh Glauert untuk memodelkan interaksi antara turbin dan aliran fluida terhadap  $dT$  (*thrust force*) dan  $dQ$  (torsi) yang berlaku pada tiap *blade element* dengan ketebalan tertentu. Pendekatan tersebut dapat diringkas sebagai berikut:

$$dT = \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda dr \dots \dots \dots (2.16)$$

$$dQ = \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda r dr \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana:

- $dT$  : Gaya *thrust* elementer
- $dQ$  : Torsi elementer
- $B$  : Jumlah bilah
- $r$  : Radius *blade element*
- $\gamma_\lambda$  : *Twist angle*
- $\varphi$  : *Flow angle*

Persamaan teori momentum diturunkan dengan asumsi bahwa gaya dari bilah pada aliran adalah konstan di setiap elemen annular. Kerangka kerja seperti itu sesuai dengan rotor dengan jumlah bilah yang tak terbatas. Namun, dalam situasi kehidupan nyata, modifikasi aliran di ujung bilah harus dimasukkan untuk memperhitungkan bahwa sirkulasi cairan di sekitar blade harus turun (secara eksponensial) ke nol ketika  $r \rightarrow R$  yang disebut sebagai *tip loss correction*. Dalam hal ini, mengingat jumlah bilah  $B$  dan jari-jari  $r$  dari turbin dipertimbangkan, Glauert menggunakan *Prandtl tip function*  $f_\lambda$  sebagai berikut.

$$F_\lambda(\varphi) := \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \exp \left( - \frac{\frac{B}{2} (1 - \frac{\lambda U - \infty}{\Omega R})}{(\frac{\lambda U - \infty}{\Omega R}) \sin \varphi} \right) \right) \dots \dots \dots (2.18)$$

$$F_\lambda(\varphi) := \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \exp \left( - \frac{\frac{B}{2} (1 - \frac{r}{R})}{(\frac{r}{R}) \sin \varphi} \right) \right) \dots \dots \dots (2.19)$$

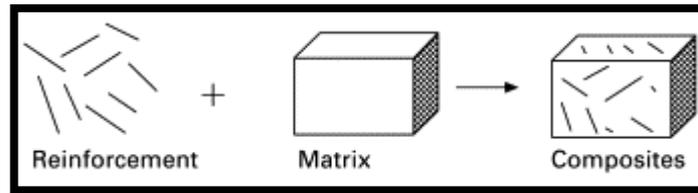
*Prandtl tip function*  $f_\lambda$  berfungsi sebagai faktor tambahan dalam persamaan (2.16) dan (2.17). Modifikasi ini memunculkan persamaan sebagai berikut.

$$dT = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda dr \dots \dots (2.20)$$

$$dQ = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda r dr \dots \dots (2.21)$$

### 2.1.7 Komposit

Komposit adalah salah satu material yang terbentuk dari dua atau lebih komponen (bahan penguat dan matriks), yang memiliki karakteristik yang berbeda dengan bahan-bahan pembentuknya dan secara makroskopis dicampur dengan tetap memiliki batas fasa yang jelas dan teridentifikasi. Bahan komposit pada umumnya terdiri dari dua unsur, yaitu serat (*fiber*) sebagai pengisi dan matriks sebagai bahan pengikat serat. Sebagai bahan pengisi, serat digunakan untuk menahan gaya yang bekerja pada bahan komposit, dan matriks berfungsi melindungi serta mengikat serat agar dapat bekerja dengan baik terhadap gaya-gaya yang terjadi. (Chawla, 1987)



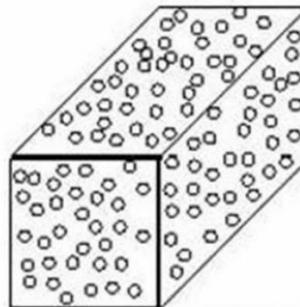
**Gambar 2. 11** Representasi Skematis dari Komposit

**1. Klasifikasi Bahan Komposit**

Komposit dibedakan menjadi 4 jenis menurut bentuk struktur dari penyusunnya, yaitu:

a. Komposit Partikel (*Particulate Composite*)

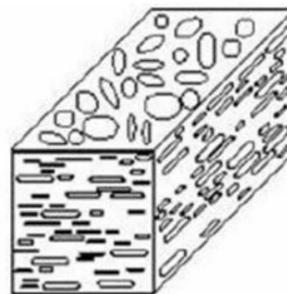
Komposit partikel adalah salah satu jenis komposit dimana dalam matriksnya ditambahkan material lain berupa serbuk/butir. Dalam komposit partikel, material penambah terdistribusi secara acak atau kurang terkontrol dari pada komposit serpih, sebagai contoh adalah beton. (Schwartz, 1984)



**Gambar 2. 12** Komposit partikel

b. Komposit Serpih (*Flake Composite*)

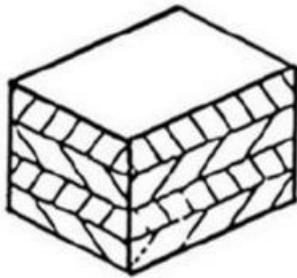
Komposit serpih adalah komposit dengan penambahan material berupa serpih kedalam matriksnya. Serpih dapat berupa serpihan mika, glass dan metal. (Schwartz, 1984)



**Gambar 2. 13** Komposit serpih

c. *Laminat Composite*

Laminat Composite adalah komposit dengan susunan dua atau lebih layer, dimana masing-masing layer dapat berbeda-beda dalam hal material, dan orientasi penguatnya. (Schwartz, 1984)



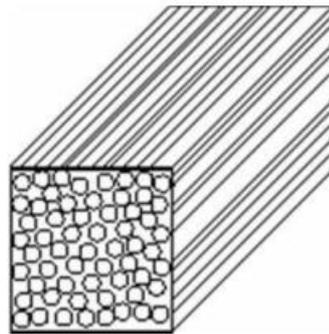
**Gambar 2. 14** Laminat composite

d. Komposit Serat (*Fiber Composite*)

Komposit serat merupakan komposit yang hanya terdiri dari satu lapisan yang menggunakan penguat berupa serat. Serat yang digunakan dapat berupa serat sintetis dan serat alam. Serat disusun secara acak maupun orientasi tertentu bahkan dapat juga dalam bentuk yang lebih kompleks seperti anyam. Komposit serat dapat dibagi berdasarkan penempatannya, yaitu: (Schwartz, 1984)

- *Continuous Fiber Composite*

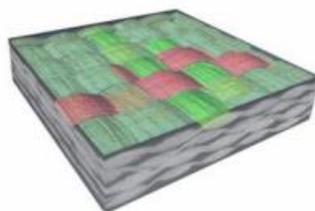
Tipe ini mempunyai susunan serat panjang dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Tipe ini mempunyai kelemahan pemisahan antar lapisan.



**Gambar 2. 15** Continous fiber composite

- *Woven Fiber Composite (bi-directional)*

Komposit ini tidak mudah dipengaruhi pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya mengikat antar lapisan. Susunan serat memanjang yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan melemah

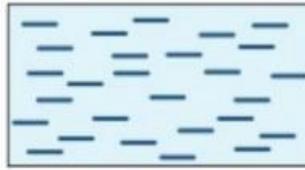


**Gambar 2. 16** Woven fiber composite

- *Discontinuous Fiber Composite*

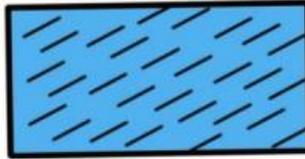
*Discontinuous Fiber Composite* adalah tipe komposit dengan serat pendek. Tipe ini dibedakan menjadi 3, yaitu:

- *Aligned discontinous fiber*



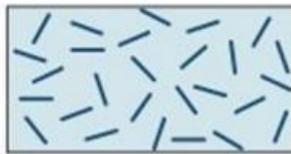
**Gambar 2. 17** Aligned discontinuous fiber

- *Off-axis aligned discontinuous fiber*



**Gambar 2. 18** Off-axis discontinuous fiber

- *Randomly oriented discontinuous fiber*



**Gambar 2. 19** Randomly oriented discontinuous fiber

- *Hybrid fiber composite*

*Hybrid fiber composite* merupakan komposit gabungan antara tipe serat lurus dengan serat acak. Tipe ini digunakan supaya dapat mengganti kekurangan sifat dari kedua tipe dan dapat menggabungkan kelebihan keduanya.

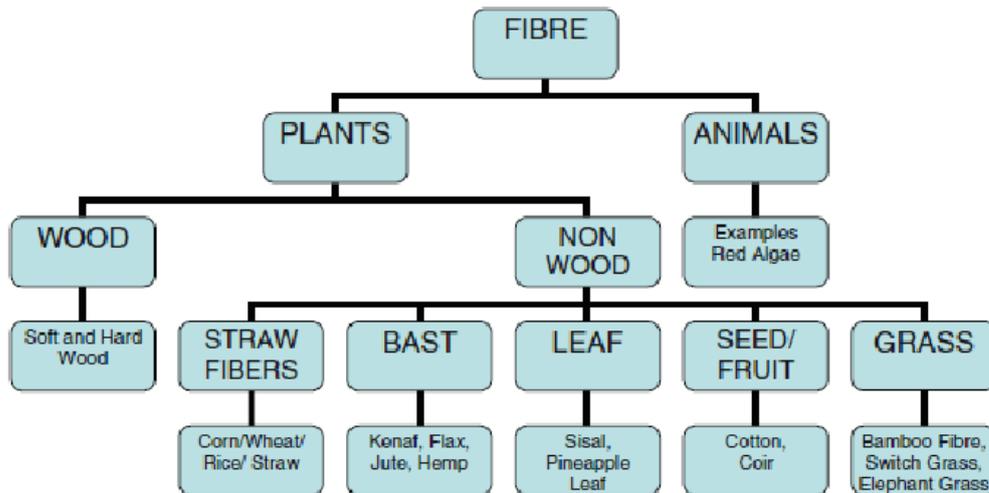


**Gambar 2. 20** Hybrid fiber composite

### 2.1.8 Serat Alam

Secara umum serat alam yang berasal dari tumbuhan dapat dikelompokkan berdasarkan bagian tumbuhan yang diambil seratnya. Berdasarkan hal tersebut pengelompokan dibedakan menjadi 3, yaitu:

- Serat dari batang (*Bast Fiber*); contohnya serat jute, serat rami dan serat kenaf.
- Serat dari daun (*Leaf Fiber*); contohnya serat sisal, serat nanas dan serat abaka.
- Serat dari buah (*Seed Fiber*); contohnya serat kelapa



**Gambar 2. 21** Klasifikasi Jenis Serat Alam

Sebagai bahan penguat (*reinforcement*) pada struktur komposit, serat alami memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan serat sintetis yang selama ini digunakan, yaitu:

- Biodegradable*, yaitu kemampuan untuk dapat terurai secara alami sehingga tidak menimbulkan masalah berkepanjangan dalam hal limbah.
- Merupakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui.
- Harganya relatif murah dan ketersediannya cukup melimpah di alam.

Dari segi sifat mekanik, serat alami ini memiliki variasi yang besar yang terjadi karena keberagaman pola tumbuh, seperti lokasi tumbuh, kondisi tanah, dan umur saat dipanen. Sehingga sifat mekanik serat yang berasal dari daerah yang berlainan untuk jenis serat yang sama bisa saja berbeda. Selain itu serat alam juga memiliki sifat hidrofil yaitu mudah menyerap air. Hal ini dapat mempengaruhi sifat mekanik dari serat tersebut.

**Tabel 2. 2** Komparasi sifat mekanik dari serat Alam

Fibre	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation At break (%)	Specific Tensile Strength (MPa/ g.cm <sup>-3</sup> )	Specific Young's Modulus (GPa/g.cm <sup>-3</sup> )
Jute	1.3-1.45	393-773	13-26.5	1.16-1.5	286-562	9-19
Flax	1.5	345-1100	27.6	2.7-3.2	230-773	18
Ramie	1.5	400-938	61.4-128	1.2-3.8	267-625	41-85
Sisal	1.45	468-640	9.4-22.0	3-7	323-441	6-15
Coir	1.15	131-175	4-6	15-40	114-152	3-5

## 1. Serat Sisal

Sisal merupakan salah satu serat alam yang paling banyak digunakan dan paling mudah dibudidayakan. Serat sisal dihasilkan dari daun tanaman *agave sisalana*. Tanaman ini cocok dibudidayakan di tanah kering dan beriklim kering dikarenakan tanaman ini tidak tahan genangan air. Syarat tumbuh dari tanaman ini adalah terpapar sinar matahari dengan kelembaban udara *moderate* (70-80%), temperatur maksimum 27-28°C, tanah lempung berpasir, dengan pH tanah berkisar antara 5,5 – 7,5. Tanaman sisal merupakan tanaman yang batang dan daunnya menyatu, mempunyai serat yang kuat, dapat hidup pada lahan yang lapisan olahannya tipis. Kekuatan dari sisal ini lebih baik dibanding serat lainnya, serta tahan terhadap kadar garam tinggi. (Basuki & Verona, 2017)



**Gambar 2. 22** Tanaman Sisal

Tanaman ini dihasilkan oleh negara Brazil sebagai penghasil sisal terbesar di dunia, China, Kenya, Tanzania, Madagaskar, Indonesia, dan Thailand. Tanaman sisal di Indonesia banyak dibudidayakan di Pulau Madura, Malang Selatan, Jember, Blitar Selatan, dan di Kabupaten Sumbawa. Satu tanaman sisal dapat memproduksi sekitar 200-250 daun dan satu daun terdiri atas 1000-1200 bundel serat. Penggunaan serat sisal telah menjamur di berbagai bidang, yaitu dalam bidang kelautan, pertanian, kerajinan, dan keamanan (seperti penggunaan dalam pembuatan rompi anti peluru). Panjang serat sisal dapat bervariasi antara 1.0 – 1.5 meter dengan diameter antara 100-300 mm. (Kusumastuti, 2009)



**Gambar 2. 23** Ladang Budidaya Sisal di Sumbawa



**Gambar 2. 24** Serat Sisal

**Tabel 2. 3** *Material Properties* dari Serat Sisal (Kusumastuti, 2009)<sup>(1)</sup> (Rouway, 2020)<sup>(2)</sup>  
(Acosta-Calderon, Gordillo-Silva, & Garcia-Troncoso, 2021)<sup>(3)</sup>

Properties	
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	1450 <sup>(1)</sup>
<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)	530 <sup>(1)</sup>
Modulus Young (GPa)	9,4 <sup>(1)</sup>
Poisson's <i>Ratio</i>	0,32 <sup>(2)</sup>
<i>Compressive Strength</i> (MPa)	33,6 <sup>(3)</sup>
<i>Shear Strength</i> (MPa)	19,1 <sup>(3)</sup>

### 2.1.9 Epoxy Resin

Resin epoksi atau secara umum di pasaran dikenal dengan bahan epoksi adalah salah satu dari jenis polimer yang berasal dari kelompok termoset. Resin termoset adalah polimer cair yang diubah menjadi bahan padat secara polimerisasi jaringan silang dan juga secara kimia, membentuk formasi rantai polimer tiga dimensi. Sifat mekaniknya tergantung pada unit molekuler yang membentuk jaringan rapat dan panjang jaringan silang. Resin epoksi banyak digunakan untuk bahan komposit di beberapa bagian struktural, resin ini juga digunakan sebagai bahan campuran pembuatan kemasan, bahan cetakan dan perekat. (Gemert, L.Czarnecki, P.Lukowski, & E.Knapen, 2004)

**Tabel 2. 4** *Material Properties* dari Matriks Epoxy (AnsysR2, 2020)

Properties	
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	1160
<i>Tensile Yield Strength</i> (MPa)	97
Modulus Young (GPa)	3,78
Poisson's <i>Ratio</i>	0,35
<i>Compressive Strength</i> (MPa)	104
<i>Shear Strength</i> (MPa)	40

**2.1.10 Rules of Mixtures**

*Rules of Mixtures* (ROM) merupakan suatu metode yang dapat digunakan untuk menghitung kekuatan pada komposit secara teoritis dengan menggunakan penjumlahan kekuatan tiap penyusun dengan menggunakan fraksi volume tiap penyusun tersebut. Dalam material komposit, terdapat 2 *properties* yang harus diketahui agar dapat dilakukan simulasi pada Ansys. *Properties* tersebut adalah *Material Orthotropic Elasticity* dan *Material Orthotropic Stress Limit*. Adapun persamaan ROM adalah sebagai berikut (Daniel & Ishai, 2006).

$$V = V_f + V_m + V_v$$

$$v_f = \frac{V_f}{V} \quad v_m = \frac{V_m}{V} \quad v_v = \frac{V_v}{V} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana,  $V$  dan  $v$  merupakan volume dan volume fraksi dari elemen. *Subscript*  $f$ ,  $m$ , dan  $v$  ditujukan untuk *fiber*, matriks, dan *void*. Dari kedua persamaan diatas, maka didapat :

$$v_f + v_m + v_v = 1$$

Saat proses penyatuan *fiber* dan matriks dianggap baik, maka *void* atau rongga kosong dapat diabaikan, sehingga persamaan dapat menjadi :

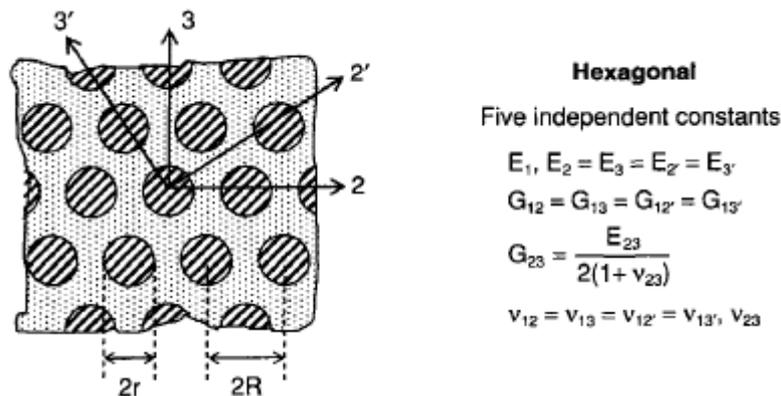
$$v_m = 1 - v_f$$

Sehingga didapatkan rumus untuk massa jenis komposit adalah :

$$\rho_c = v_f \rho_f + v_m \rho_m \dots\dots\dots (2.23)$$

**1. Material Orthotropic Elasticity**

Pada komposit dengan jenis *unidirectional* memiliki beberapa nilai dari *material orthotropic elasticity*, nilai tersebut dibagi atas dua *properties*, yaitu *longitudinal properties* dan *transverse properties*. *Longitudinal properties* terbagi atas Young's modulus ( $E_1$ ), Poisson's ratio ( $\nu_{12}$  dan  $\nu_{13}$ ), dan *shear modulus* ( $G_{12}$  dan  $G_{13}$ ). Kemudian, *Transverse properties* terbagi atas Young's modulus ( $E_2$  dan  $E_3$ ), Poisson's ratio ( $\nu_{23}$ ), dan *shear modulus* ( $G_{23}$ ) (Daniel & Ishai, 2006).



**Gambar 2. 25** Model Komposit *Unidirectional* dengan pemodelan geometri *Hexagonal*

Persamaan *longitudinal Young modulus* pada elemen dengan hubungan matriks dan *fiber* dapat dituliskan menjadi :

$$E_1 = v_f E_f + v_m E_m \dots\dots\dots (2.24)$$

Sedangkan untuk nilai *Young modulus* transversal atau  $E_2$  dan  $E_3$  dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$E_2 = \left( \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m} \right)^{-1} \dots\dots\dots(2.25)$$

Untuk mencari nilai *longitudinal shear modulus*  $G_{12}$  dan  $G_{13}$  serta *transversal shear modulus*  $G_{23}$ , dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$G_{12} = G_m \frac{(1+V_f)G_f + V_m G_m}{V_m G_f + (1+V_f)G_m} \dots\dots\dots(2.26)$$

$$G_{23} = \frac{G_m K_m (G_m + G_f) + 2G_f G_m + K_m (G_f - G_m) V_f}{K_m (G_m + G_f) + 2G_f G_m - (K_m + 2G_m) (G_f - G_m) V_f} \dots\dots\dots (2.27)$$

Untuk *longitudinal poisson ratio* ( $v_{12}$ ) dan ( $v_{13}$ ) serta *transversal poisson ratio* ( $v_{23}$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$v_{12} = V_f v_f + V_m v_m \dots\dots\dots(2.28)$$

$$v_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1 \dots\dots\dots(2.29)$$

## 2. Material Orthotropic Stress Limit

*Orthotropic Stress Limit* adalah nilai kekuatan dari material komposit. Nilai ini dibagi atas 2 *properties*, yakni *longitudinal properties* dan *transversal properties*. *Longitudinal properties* terbagi atas *tensile strength X direction*, *compressive strength X direction*, *shear strength XY*, dan *shear strength XZ*. Sedangkan untuk *transversal properties* terbagi atas *tensile strength Y direction*, *tensile strength Z direction*, *compressive strength Y direction*, *compressive Z direction*, dan *shear strength YZ*.

Persamaan untuk *longitudinal tensile strength* pada komposit dibagi atas dua kondisi. Kondisi pertama adalah ketika nilai  $\epsilon_m > \epsilon_f$  dan kondisi kedua adalah ketika nilai  $\epsilon_m < \epsilon_f$ . Rumus perhitungan dari kedua kondisi tersebut adalah sebagai berikut (Kumar, 2017) :

Untuk nilai  $\epsilon_m > \epsilon_f$

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = (\sigma_{x_f}^T) V_f + (\epsilon_{1_f}^T)_{ult} E_m (1 - V_f) \dots\dots\dots(2.30)$$

Untuk nilai  $\epsilon_m < \epsilon_f$

$$(\sigma_{x_c}^T)_{ult} = (\epsilon_{1_m}^T) E_{1_f} V_f + (\sigma_m^T)_{ult} (1 - V_f) \dots\dots\dots(2.31)$$

Selanjutnya persamaan untuk *transverse tensile strength* pada komposit adalah sebagai berikut:

$$(\sigma_{y_c}^T)_{ult} = E_{2c} \left[ 1 + \left( \frac{E_m}{E_{2f}} - 1 \right) V_f \right] (\epsilon_m^T)_{ult} \dots\dots\dots(2.32)$$

Persamaan untuk *longitudinal compressive strength* dan *transverse compressive strength* adalah sebagai berikut :

$$(\sigma_{x_c}^c)_{ult} = 2(\tau_f)_{ult} \left[ V_f + \frac{E_m}{E_{2f}} - (1 - V_f) \right] \dots\dots\dots (2.33)$$

$$(\sigma_{y_c}^c)_{ult} = E_{2c} \left[ 1 + \left( \frac{E_m}{E_{2f}} - 1 \right) V_f \right] (\epsilon_m^c)_{ult} \dots\dots\dots (2.34)$$

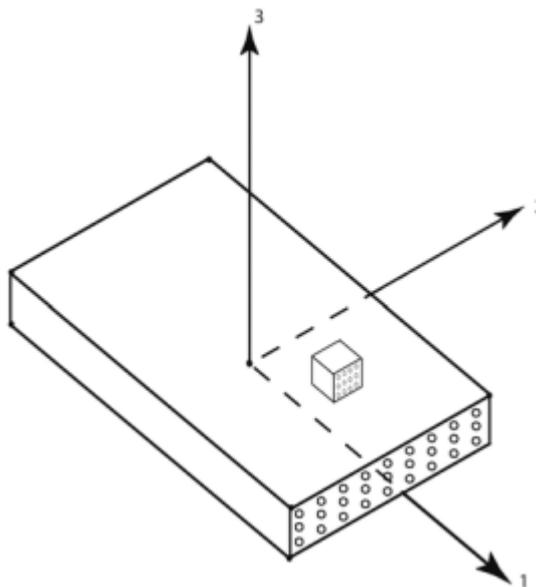
Kemudian untuk persamaan *longitudinal shear strength (In-Plane Shear)* dan *transverse shear strength (Out-Plane Shear)* adalah sebagai berikut :

$$(\tau_{xy_c})_{ult} = G_{12c} \left[ 1 + \left( \frac{G_m}{G_{12f}} - 1 \right) V_f \right] (\gamma_m)_{ult} \dots\dots\dots (2.35)$$

$$(\tau_{yz_c})_{ult} = \frac{(\tau_{xy_c})_{ult}}{2} \dots\dots\dots (2.36)$$

**2.1.11 Stiffness ABD Matriks**

*Stiffness ABD Matriks* adalah suatu matriks yang dapat menyatakan nilai dari kekakuan suatu material komposit. Matriks ini terdiri atas 3 matriks, yakni matriks A yang menyatakan nilai *extensional stiffness*, matriks B yang menyatakan nilai *coupling stiffness*, dan matriks D yang menyatakan nilai dari *bending stiffness*. Analisa struktur dari laminasi komposit dapat dilakukan dengan menggunakan *Classical Lamination Theory*. Tiap lapisan pada komposit dianggap *orthotropic* dan *linearly elastic*. *Orthotropic* adalah sifat material komposit, di mana kekuatan untuk tiap arah yang tegak lurus arah sumbu x, y, dan z berbeda-beda. Dalam aplikasinya pada material komposit, dapat diasumsikan kondisi *plane stress*, di mana kondisi ini hanya berfokus pada bagian *in plane*, sehingga arah *out of plane* dapat diabaikan pada material komposit. Jika ditunjukkan pada gambar 2.26, *plane stress* arah 3 (tiga) dapat diabaikan (Voyiadjis & Kattan).



**Gambar 2. 26** Lamina dengan Sistem Koordinat Material Utama

Dengan mengasumsikan kondisi *plane stress*, persamaan hubungan *stress-strain* yang awal mulanya adalah:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.36)$$

dengan diabaikannya *plane stress*, arah tiga yang mana nilai  $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$ , maka rumus di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.37)$$

Jika matriks di atas di-*inverse* maka didapat persamaan matriks:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.38)$$

Di mana nilai dari  $Q_{ij}$  didapatkan dari rumus berikut:

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \dots\dots\dots(2.39)$$

$$Q_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \dots\dots\dots(2.40)$$

$$Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \dots\dots\dots(2.41)$$

$$Q_{66} = \frac{1}{S_{66}} \dots\dots\dots(2.42)$$

Dan nilai dari  $S_{ij}$  didapatkan dari rumus berikut:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \dots\dots\dots(2.43)$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \dots\dots\dots(2.44)$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_2} \dots\dots\dots(2.45)$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \dots\dots\dots(2.46)$$

Makna dari notasi-notasi yang ada di atas antara lain  $\varepsilon$  merupakan simbol regangan normal,  $\gamma$  adalah simbol dari regangan geser, untuk  $E$  merupakan simbol dari modulus elastisitas,  $G$  merupakan simbol dari modulus *shear*,  $\nu$  merupakan *poisson ratio*,  $\sigma$  merupakan tegangan normal, dan  $\tau$  merupakan simbol dari tegangan geser. Untuk  $Q$  merupakan *stiffness* dari komponen yang mana rumusnya dapat diturunkan menjadi:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Nilai  $\nu_{21}$  didapat dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\nu_{21} = \frac{E_2\nu_{12}}{E_1}$$

Transformasi antara lapisan material lokal menjadi lapisan material global perlu dilakukan dengan menggunakan formula berikut:

$$T = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & 2CS \\ S^2 & C^2 & -2CS \\ -CS & CS & C^2 - S^2 \end{bmatrix}, C = \text{Cos } \theta, S = \text{Sin } \theta \dots \dots \dots (2.47)$$

Dengan matriks transformasi di atas, matriks *stiffness global* dapat ditemukan dengan persamaan berikut:

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} [T] \dots \dots \dots (2.48)$$

Setelah matriks *stiffness global* didapatkan, selanjutnya mencari matriks  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ , dan  $D_{ij}$  dengan menghitung menggunakan rumus di bawah ini, di mana  $h$  merupakan tinggi dari laminasi dan  $k$  merupakan angka dari *layer*.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (h_k - h_{k-1}), i = 1,2,6; j = 1,2,6 \dots \dots \dots (2.49)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), i = 1,2,6; j = 1,2,6 \dots \dots \dots (2.50)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3), i = 1,2,6; j = 1,2,6 \dots \dots \dots (2.51)$$

### 2.1.12 Teori Kegagalan

Beberapa metode yang digunakan untuk mengetahui kegagalan dalam sebuah material desain adalah *Von-Mises criterion* dan *Tsai-wu failure criterion*. Tentunya metode ini tidak sepenuhnya akurat akan tetapi dengan menggunakan metode ini, didapatkan sebuah hasil pendekatan untuk mengetahui kegagalan dalam sebuah material.

#### 1. Von-Mises Criterion

Von – Mises Criterion adalah teori kegagalan yang biasanya digunakan untuk material ductile atau ulet. Teori ini memprediksi bahwa material akan gagal bila tegangan yang terjadi ( $\sigma'$ ) lebih besar dibandingkan kekuatan luluh ( $S_y$ ) dari sebuah material. Untuk analisis

perancangan akan lebih mudah jika kita menggunakan tegangan Von Mises. Perumusan tegangan Von Mises yaitu,

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \dots\dots\dots(2.52)$$

Hal ini akan terjadi kegagalan jika

$$\sigma' \geq S_y$$

**2. Tsai-Wu Failure Criterion**

Kegagalan dalam laminasi orthotropic dapat di tentukan dengan menggunakan berbagai macam teori kegagalan yang dimiliki untuk menentukan kegagalan material orthotropic. Terdapat berbagai macam, salah satu contohnya adalah Tsai Wu Failure Criterion. Teori kegagalan Tsai – wu adalah teori kegagalan yang dapat memprediksi kekuatan dari material tanpa adanya data eksperimen yang dapat digunakan. Selain itu terdapat juga keunggulan yang dimiliki dalam penggunaan dari teori kegagalan tsai – wu, dimana teori ini operasionalnya sangat mudah dan sangat mudah dibaca untuk prosedur komputasi. Dimana untuk teori Tsai Wu dapat di tentukan nilai faktor kegagalannya melalui rumus:

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_1^T \sigma_1^C}$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_2^T \sigma_2^C}$$

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} - \frac{1}{\sigma_1^C}$$

$$F_2 = \frac{1}{\sigma_2^T} - \frac{1}{\sigma_2^C}$$

$$F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^F)^2}$$

$$F_{12} \approx -\frac{1}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}} \dots\dots\dots(2.53)$$

Dimana:

- $\sigma_1^T$  : material tensile strength laminasi sepanjang arah serat
- $\sigma_1^C$  : material compressive strength laminasi sepanjang arah serat
- $\sigma_2^T$  : material tensile strength laminasi melintang dari arah serat
- $\sigma_2^C$  : material compressive strength laminasi melintang dari arah serat
- $\tau_{12}^F$  : shear stress laminasi

**2.1.13 Finite Element Method (FEM)**

Salah satu metode numerik yang akurat dan dapat digunakan untuk memecahkan permasalahan dalam *engineering* baik itu simpel maupun kompleks adalah *Finite Element Method*. Metode ini pertama kali digunakan pada tahun 1956 untuk menganalisis permasalahan terkait struktur *aircraft*. Seiring berjalannya waktu, *Finite Element Method* merupakan metode yang terbaik dalam menganalisis berbagai macam permasalahan analisa struktur dalam *engineering*. Beberapa macam permasalahan yang dapat diselesaikan dengan menggunakan metode ini antara lain analisis struktur, perpindahan panas dan massa, aliran fluida, dan potensial elektromagnetik.

*FEM* memiliki kemampuan untuk melakukan analisis terhadap suatu geometri khusus yang rumit dan kompleks. Jika dibandingkan dengan metode matematika analitis, metode *FEM* jauh memiliki keunggulan karena mampu menyelesaikan masalah *engineering* dengan biaya dan waktu yang hemat serta keakuratan yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan metode matematika analitis membutuhkan persamaan diferensial yang lebih terperinci pada setiap detail geometri, sedangkan metode *FEM* mendiskritisasi sebuah objek menjadi elemen-elemen kecil yang saling berhubungan dalam pemodelan struktural. (Erhunmwun & Ikponmwo, 2017)

### 1. Macam-Macam Metode Numerik dan Keunggulan *FEM*

Beberapa metode numerik yang biasa digunakan untuk memecahkan masalah :

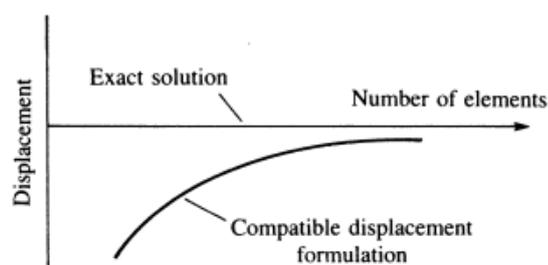
- a. The Rayleigh-Ritz Method
- b. Methods of weighted-residuals
- c. Metode Petrov-Galerkin
- d. *Least-squares method*
- e. *Collocation method*
- f. *Finite Element Method*

Berdasarkan 6 macam metode numerik diatas, *Finite Element Method* memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan metode numerik lainnya. Keunggulan tersebut yaitu,

- a. Struktur yang dianalisis dapat memiliki bentuk yang berubah-ubah, beban, dan *fixed support*.
- b. Metode yang sangat serbaguna
- c. Mesh matriks dapat mencampur elemen dari jenis yang berbeda
- d. Struktur yang dibentuk oleh *FEM* mampu memiliki kemiripan yang dekat dengan model struktur sebenarnya

### 2. Uji Konvergensi

Pada analisis menggunakan *FEM* tentunya dibutuhkan suatu metode untuk mendapatkan hasil yang akurat pada jumlah elemen tertentu, metode itu adalah Uji Konvergensi. Uji Konvergensi ini dilakukan dengan memodelkan jumlah elemen yang berbeda-beda. Semakin banyak jumlah elemen yang digunakan, maka hasil yang didapatkan akan mendekati keakuratan, namun tentunya hal ini akan memerlukan waktu yang lama dalam menyelesaikan analisis. Maka dari itu, uji konvergensi ini akan digunakan untuk memilih jumlah elemen paling sedikit dan hasilnya tetap akurat. Pada analisis struktur, jumlah elemen yang sedikit dapat digunakan untuk menganalisis kasus-kasus sederhana dengan akurat. Namun pada kasus analisis struktur dengan geometri dan pembebanan yang kompleks diperlukan jumlah elemen yang banyak untuk mendapatkan pemodelan yang akurat. (Logan, 2002)



Gambar 2. 27 Uji Konvergensi Hasil FEM

### 2.1.14 Computational Fluid Dynamics (CFD)

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah metode komputasi yang digunakan untuk menentukan solusi numerik dari persamaan yang mengatur aliran fluida. Prinsip yang digunakan dalam metode ini adalah suatu ruang berisi fluida yang akan dilakukan perhitungan dibagi menjadi beberapa bagian. Bagian-bagian ini disebut dengan *cell* dan prosesnya bernama *meshing*. *Cell* merupakan sebuah kontrol perhitungan yang akan dilakukan oleh komputer. Dalam setiap *cell* akan dilakukan perhitungan dengan batasan *domain* dan *boundary condition* yang telah ditentukan. CFD memungkinkan untuk menganalisis *fluid mechanic* secara mendalam. Sebagian besar hasil dari metode CFD ini memberikan peningkatan kinerja dan keandalan yang lebih baik. Secara umum, proses perhitungan CFD terdiri atas 3 bagian utama, yaitu sebagai berikut. (Xia & Sun, 2002)

#### 1. Pre-processing

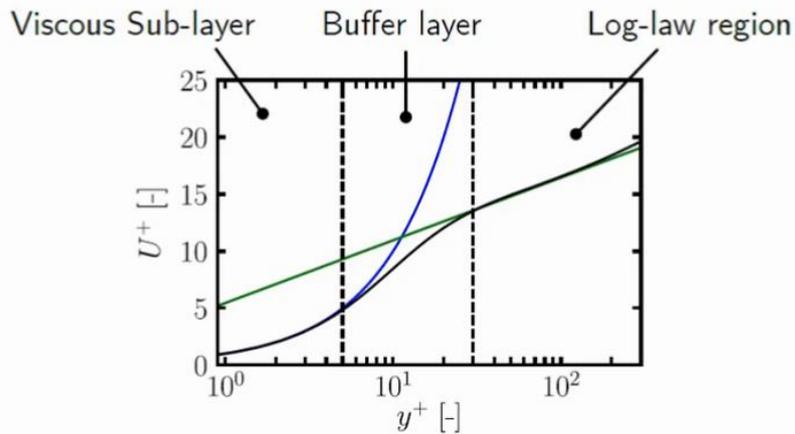
Seluruh proses sebelum melakukan proses pemecahan model numerik pada CFD disebut dengan *pre-processing*. Pada tahap ini terdiri dari *problem thinking*, *meshing*, penentuan geometri model menjadi *domain* komputasi, dan yang terakhir adalah mendefinisikan kondisi batas dan sifat fisis dari fluida yang akan digunakan.

##### a. Model Turbulensi SST k- $\omega$

Pada tahun 1993, Menter mengajukan sebuah metode model turbulensi baru berdasarkan atas keunggulan model turbulensi k- $\epsilon$  normal pada daerah *free stream*, dan model turbulensi k- $\omega$  pada daerah dinding dengan memperkenalkan *blending function*. Model inilah yang sekarang disebut dengan model turbulensi k- $\omega$  SST. Model turbulensi k- $\omega$  SST adalah model turbulensi Eddy-viscosity dengan dua persamaan. Model ini merupakan salah satu model turbulensi berbasis *Reynold-averaged Navier-Stokes* yang artinya semua efek turbulensi dimodelkan dengan penggunaan formulasi k- $\omega$  didalam *boundary layer* sehingga membuat model secara langsung dapat digunakan sampai ke dinding melalui *viscous sub-layer*. Model k- $\omega$  SST sering digunakan dalam komputasi CFD karena memiliki perilaku yang baik dalam menangkap *adverse pressure gradient* dan aliran separasi. Hal ini membuat model k- $\omega$  SST lebih akurat dan dapat diandalkan untuk analisis aliran pada *airfoil* yang dimana memiliki profil kelengkungan yang tinggi. (Wiratama, 2021)

##### b. Wall Function

Didalam proses komputasi CFD, aliran turbulen merupakan fenomena yang selalu terjadi dan secara signifikan dipengaruhi oleh keberadaan dinding, dimana wilayah yang terkena viskositas memiliki gradien besar dalam variabel solusi. Hal ini menyebabkan pentingnya pemodelan turbulen untuk menentukan ukuran sel yang tepat di dekat domain dinding. Setiap model turbulensi memiliki batasan nilai  $y^+$  pada dinding. Pada model turbulensi k- $\omega$  SST mengharuskan nilai  $y^+$  pada dinding diantara 30 dan 300. Aliran dengan kecepatan yang tinggi memiliki *boundary layer* yang tipis sehingga menghasilkan nilai  $y^+$  yang sangat kecil, oleh sebab itu ukuran elemen yang dekat dengan dinding harus dikurangi.



**Gambar 2. 28** Batasan daerah *viscous sub-layer*, *buffer layer*, dan *log-law region*

Persamaan *standard wall functions* adalah sebagai berikut.

$$U^+ = y^+ \text{ untuk } y^+ < 5$$

$$U^+ = \frac{1}{k} \log(Ey^+) \text{ untuk } 30 < y^+ < 200$$

Terdapat 2 cara yang dapat digunakan agar model turbulensi valid untuk membentuk turbulensi di area dekat dengan dinding. Cara yang pertama adalah dengan menggunakan model turbulensi Reynold rendah untuk menyelesaikan daerah di dekat dinding sehingga nilai sentroid *cell* pertama harus ditempatkan di daerah *viscous-sub layer* yang berarti nilai  $y^+ = 1$ . Akan tetapi dengan menempatkan di daerah *viscous-sub layer*, menyebabkan jumlah *cell* yang terlalu banyak dan akan memakan waktu yang lama dalam proses *solving*. Cara yang kedua adalah dengan menggunakan *wall functions*. *Wall functions* adalah persamaan yang diturunkan secara empiris dan digunakan untuk memenuhi hukum fisika di daerah dekat dinding sehingga sentroid *cell* pertama hanya perlu ditempatkan di wilayah *log-law* yang berarti nilai  $y^+$  adalah  $30 < y^+ < 300$  (Avraham, 2020). Perumusan  $y^+$  (*wall distance*) adalah sebagai berikut. (Engineering, 2022)

$$y^+ = \frac{\rho y^* u_\tau}{\mu} \dots \dots \dots (2.54)$$

Dimana:

- $y^+$  : jarak dinding normal non-dimensional
- $u_\tau$  : kecepatan gesekan
- $v$  : kecepatan fluida
- $y^*$  : tinggi dinding

Kecepatan gesekan merupakan referensi berdasarkan tegangan geser dinding yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \dots \dots \dots (2.55)$$

Dimana:

- $\tau_w$  : Tegangan geser pada dinding
- $\rho$  : Massa jenis fluida

Tegangan geser pada dinding juga dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho U^2 \dots \dots \dots (2.56)$$

Dimana:

$C_f$  : Koefisien gesek pada dinding

$U$  : Kecepatan *freestream*

Perkiraan gesekan pada dinding dapat dirumuskan menggunakan *skin friction correlation Schlichting*:

$$C_f = [2 \log_{10}(Re) - 0.65]^{-2.3} \quad \text{untuk } Re < 10^9 \dots\dots\dots(2.57)$$

c. *Grid Independence Study*

Dalam proses *solving*, hasil yang didapatkan tentunya tidak langsung berupa hasil yang akurat. Hal ini dikarenakan proses *meshing* tidak bisa sepenuhnya diperhitungkan secara analitis, seperti ukuran mesh, jenis mesh, dan lain sebagainya. Tentunya ini dapat terjadi dikarenakan sifat dari geometri bilah turbin memiliki bentuk yang kompleks. Oleh karena itu, dibutuhkannya suatu metode untuk membuktikan bahwa hasil simulasi telah mendekati keakuratan terhadap pengaruh resolusi *mesh*. Metode yang akan digunakan untuk menjawab objektif diatas adalah dengan menggunakan metode *Grid Independence Test*. *Grid independence test* bertujuan untuk membuktikan bahwa hasil simulasi yang telah konvergen adalah hasil dari *boundary condition* dan hukum fisika yang telah diterapkan serta bukan karena ukuran *mesh*. *Grid independence test* merupakan suatu proses yang penting untuk desain optimal dari model CFD. Namun, proses *Grid independence test* tidak memiliki standarisasi ataupun acuan untuk kondisi *grid* optimalnya. Oleh karena itu, setiap peneliti yang menggunakan metode ini, biasanya memiliki acuan yang berbeda-beda. Acuan yang sering digunakan pada metode ini adalah dengan membandingkan laju aliran, temperatur, dan indikator lainnya. Pada penelitian ini, acuan yang digunakan adalah gaya *thrust* yang dihasilkan oleh turbin angin.

**2. Solving**

*Solving* merupakan proses pengolahan dan perhitungan dari kondisi yang telah di tetapkan pada saat *pre-processing*. Pada tahapan ini dilakukan proses komputasi numerik dengan menggunakan metode numerik berupa pendekatan variabel yang diketahui menjadi fungsi yang lebih sederhana. Pada proses ini akan dilakukan iterasi hingga semua data yang dimasukkan dapat terkalkulasi dan mencapai kondisi konvergen.

**3. Post-processing**

*Post-processing* adalah tahap akhir dalam analisis CFD. Didalam tahap ini, hasil dari komputasi numerik yang telah dilakukan akan divisualisasikan baik dalam bentuk gambar, kurva, dan animasi.

**2.1.15 Safety Factor**

*Safety Factor* diartikan sebagai nilai perbandingan antara kekuatan sebenarnya dari material dengan kekuatan yang dibutuhkan. Suatu desain akan dinyatakan aman apabila memiliki nilai faktor keamanan diatas 1,0. Nilai dengan minimal 1,0 menunjukkan bahwa desain yang dirancang mampu untuk menghindari suatu kegagalan atau keruntuhan dari struktur materialnya. Maka dari itu, tujuan dari penentuan *safety factor* pada suatu produk adalah untuk menentukan produk tersebut layak atau tidak untuk diimplementasikan. Adapun rumus dari nilai *safety factor* adalah sebagai berikut :

$$\text{Factor of Safety } (n) = \frac{\text{Yield Strength Material}}{\text{Tegangan Sesungguhnya } (\sigma)} \dots\dots\dots(2.58)$$

Untuk menghitung *safety factor* pada bilah turbin angin, serangkaian pengamatan telah dilakukan selama 50 tahun untuk memperhitungkan *safety factor* pada turbin angin 5 MW. Dua metode telah digunakan untuk menghitung *safety factor* pada turbin angin. Metode pertama yaitu berdasarkan mean dan standar deviasi nilai ekstrim, dan metode kedua adalah berdasarkan median nilai ekstrim. Melalui proses pengambilan sampel secara acak tanpa penggantian, nilai *safety factor* yang didasarkan pada median nilai ekstrim ternyata lebih sedikit variabel dan juga lebih independen dari jumlah pengamatan yang dilakukan. *Safety factor* yang dibutuhkan untuk turbin angin adalah sebesar 1,25. (Moriarty, 2008)

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, bahwa material komposit merupakan material ortotropik yang dimana memiliki teori kegagalan yaitu Tsai Wu. Pada material komposit, dinyatakan gagal apabila nilai perhitungan *stress* lebih daripada 1. Maka dari itu, kegagalan material komposit dapat diasumsikan terjadi pada lamina jika lamina mengalami kondisi berikut :

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_1^T \sigma_1^C}$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_2^T \sigma_2^C}$$

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} - \frac{1}{\sigma_1^C}$$

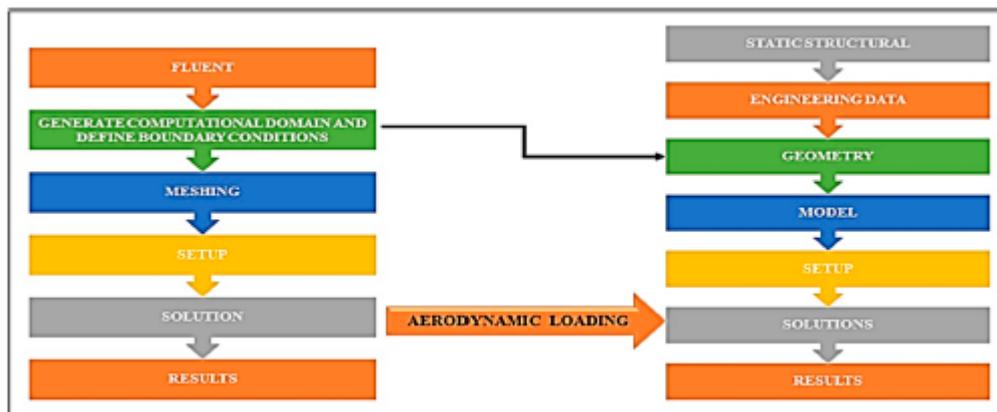
$$F_2 = \frac{1}{\sigma_2^T} - \frac{1}{\sigma_2^C}$$

$$F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^F)^2}$$

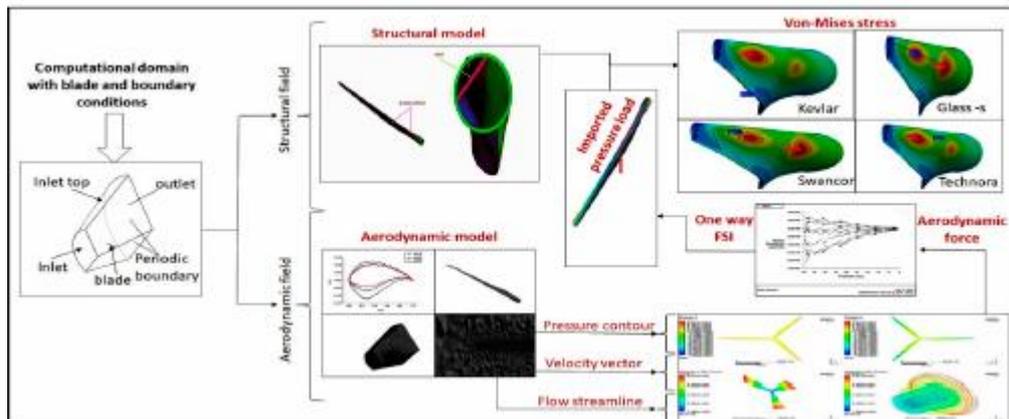
$$F_{12} \approx -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11}F_{22}} \dots \dots \dots (2.59)$$

**2.1.16 Fluid Structure Interaction**

*Fluid Structure Interaction* (FSI) adalah interaksi antara struktur dengan aliran fluida. Pada penelitian ini, bilah turbin angin mengalami kontak dengan kecepatan angin dan akan dilakukan analisis kekuatan struktur dari bilah turbin angin. FSI merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengetahui hasil kekuatan struktur dari material yang memiliki profil kelengkungan yang tinggi dan dikenakan efek dari aliran fluida. Metode FSI yang digunakan pada penelitian ini adalah metode FSI *1-way*. Hal ini dikarenakan data yang ditransfer hanya berasal dari fluida ke struktur. Data yang nantinya akan ditransfer dari fluida adalah *pressure distribution* yang selanjutnya akan menjadi *load* pada struktur. Berikut ini beberapa gambar yang dapat menjelaskan metode FSI lebih detail. (Roul & Kumar, 2020)



**Gambar 2. 29** Skematik *1-way Fluid Structure Interaction*



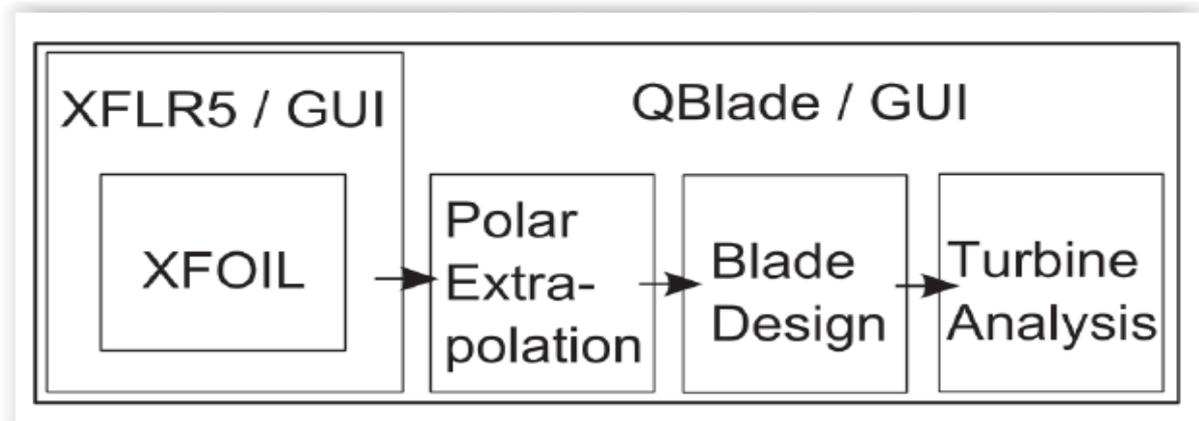
**Gambar 2. 30** *Layout aerodynamic dan structural coupling*

### 2.1.17 Qblade

Qblade merupakan *software* yang dapat digunakan untuk perhitungan performa turbin angin. Integrasi yang diterapkan pada *software* ini adalah dengan menggunakan fungsi XFOIL/XFLR5 yang memungkinkan pengguna untuk dengan cepat mendesain *airfoil* custom dan kemudian mampu untuk menghitung polar kinerja *airfoil* dan langsung mengintegrasikannya ke dalam desain dan simulasi rotor turbin angin. *Software* ini sangat memadai karena *software* ini menyediakan untuk desain dan mesimulasikan performa dari bilah turbin angin HAWT ataupun VAWT (Sapto & Rumakso, 2021).

Dalam modul Qblade desain dan optimisasi bilah dapat digunakan untuk membuat rotor bilah. Bagian-bagian bilah turbin didefinisikan oleh posisi, *chord*, *twist*, *airfoil*, dan  $360^\circ$  polar terkait. Kombinasi kode yang digunakan pada *software* ini adalah dengan menggunakan BEM dan XFOIL yang memungkinkan pengguna dapat dengan cepat merancang *custom airfoils* dan menghitung polarnya, mengekstrapolasi data polar pada kisaran  $360^\circ$  AoA, dan langsung mengintegrasikannya ke dalam simulasi rotor turbin angin. Adapun beberapa modul yang ditawarkan oleh *software* Qblade adalah sebagai berikut (Dirgantini, 2021).

1. *Airfoil design and analysis*. Modul ini memungkinkan pengguna untuk mengimpor *airfoil* dan untuk menghitung data koefisien *lift* dan *drag* pada berbagai sudut serang.
2. *Lift and drag polar extrapolation*. Modul ini memungkinkan polar yang sebelumnya dibuat dapat diekstrapolasi menjadi sudut serang  $360^\circ$ . Sebuah *airfoil* polat dapat diekstrapolasi karena koefisien *lift* dan *drag* yang terbatas dari hasil XFOIL pada sudut sebelum dan sesudah *stall*.
3. *Blade design and optimization*. Modul ini memungkinkan bilah untuk dirancang dengan menggunakan *airfoil* dan ekstrapolasi polar  $360^\circ$ . Bilah rotor ditentukan dengan mendistribusikan *airfoil* ke dalam berbagai bagian bilah seperti jumlah bilah, radius hub, panjang *chord*, sudut puntir, *twist*, dan lain-lain. Parameter tersebut dimasukkan ke dalam opsi desain bilah lanjutan.
4. *Turbine definition and simulation*. Modul ini memungkinkan untuk melakukan simulasi dengan menentukan parameter seperti pengaturan daya, kecepatan putar, kecepatan *cut in* dan *cut out*, atau efisiensi generator.



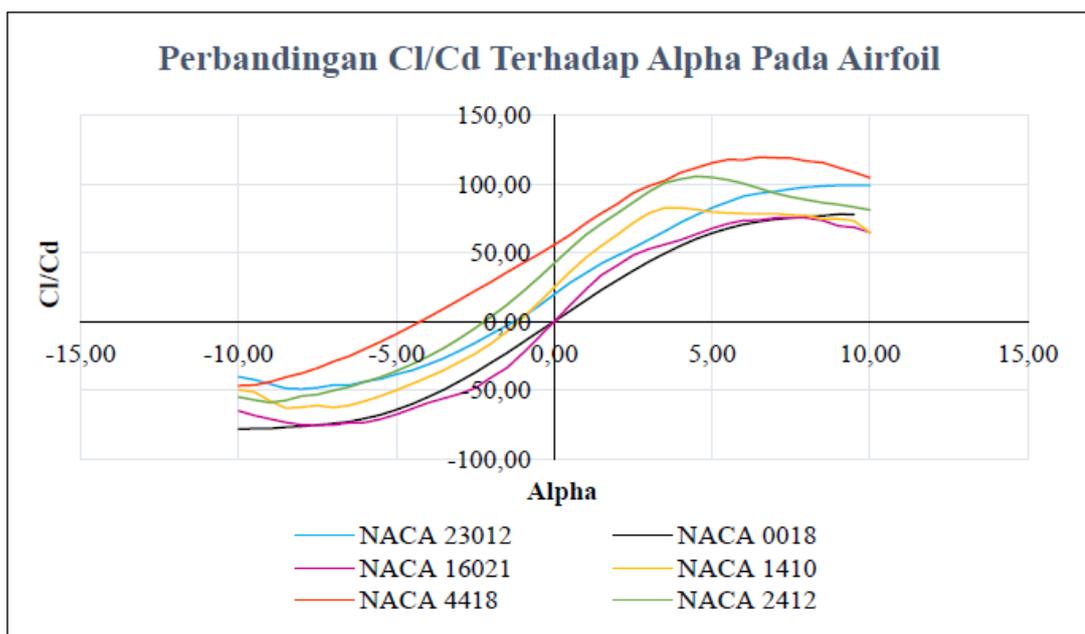
Gambar 2. 31 Modul Qblade

## 2.2 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini, penulis mengambil beberapa referensi dari penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan oleh penulis.

### 2.2.1 “Simulasi Kekuatan Struktur Kayu Pinus Terhadap Pembebanan Pada Turbin Angin Sumbu Horizontal Skala Mikro” (Dirgantini, 2021)

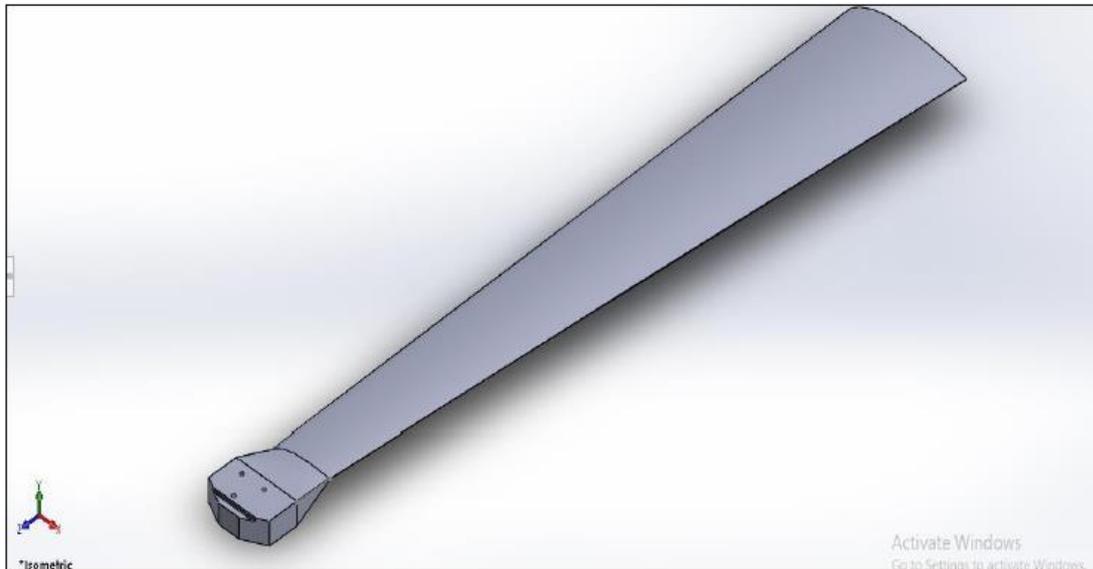
(Dirgantini, 2021) dengan penelitiannya yang berjudul “*Simulasi Kekuatan Struktur Kayu Pinus Terhadap Pembebanan Pada Turbin Angin Sumbu Horizontal Skala Mikro*” bertujuan untuk mengetahui kekuatan struktur material kayu pinus terhadap pembebanan bilah tipe *inverse taper* pada turbin angin sumbu horizontal. Pada penelitian ini digunakan kayu pinus sebagai material *core* dalam pembuatan bilah turbin angin dan bilah turbin angin yang dibuat adalah dengan tipe *inverse taper*. Adapun profil bilah turbin angin menggunakan NACA 4418. Hal ini dikarenakan pada hasil  $Cl/Cd$  terhadap  $\alpha$  yang didapatkan dengan menggunakan Qblade, bahwa NACA 4418 memiliki nilai  $Cl/Cd$  tertinggi.



Gambar 2. 32 Perbandingan nilai  $Cl/Cd$  terhadap  $\alpha$  pada Beberapa Airfoil

Bilah turbin angin yang dirancang memiliki panjang 0,8 m dan lebar chord 0,12 m pada bagian pangkal hingga 0,24 pada bagian ujung bilah turbin. Berikut ini merupakan tabel parameter perancangan dan geometri bilah turbin yang dirancang.

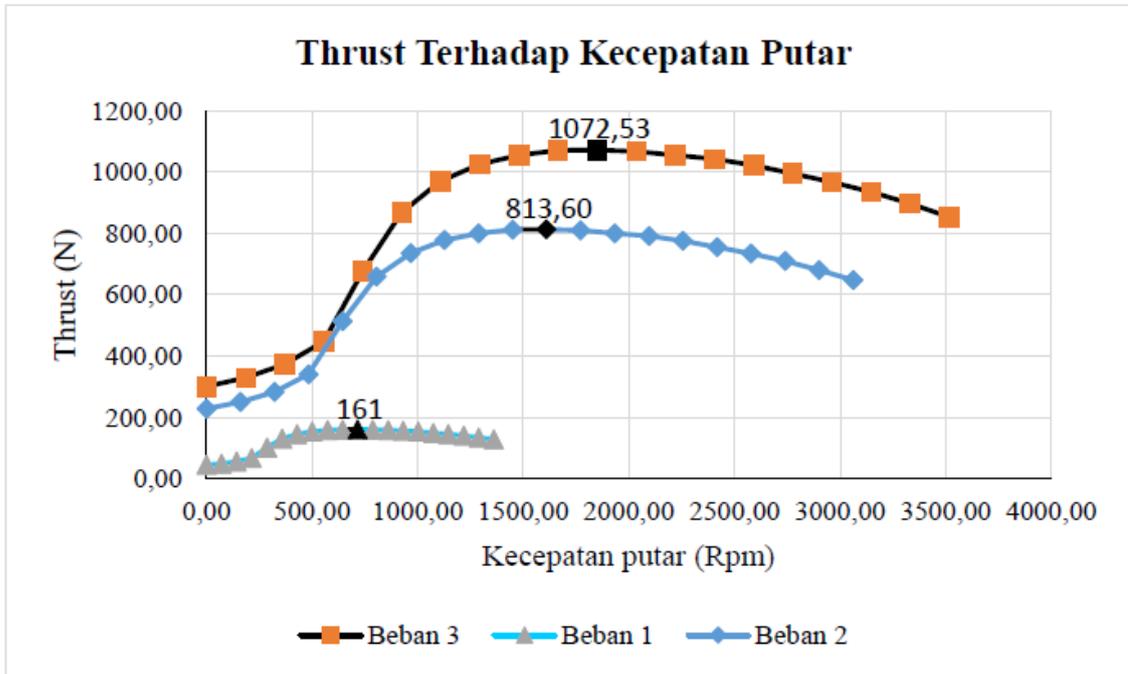
**Tabel 2. 5** Parameter Perancangan Geometri Bilah Turbin Angin



**Gambar 2. 33** Pemodelan 3D CAD Geometri Bilah Turbin Angin yang Dirancang

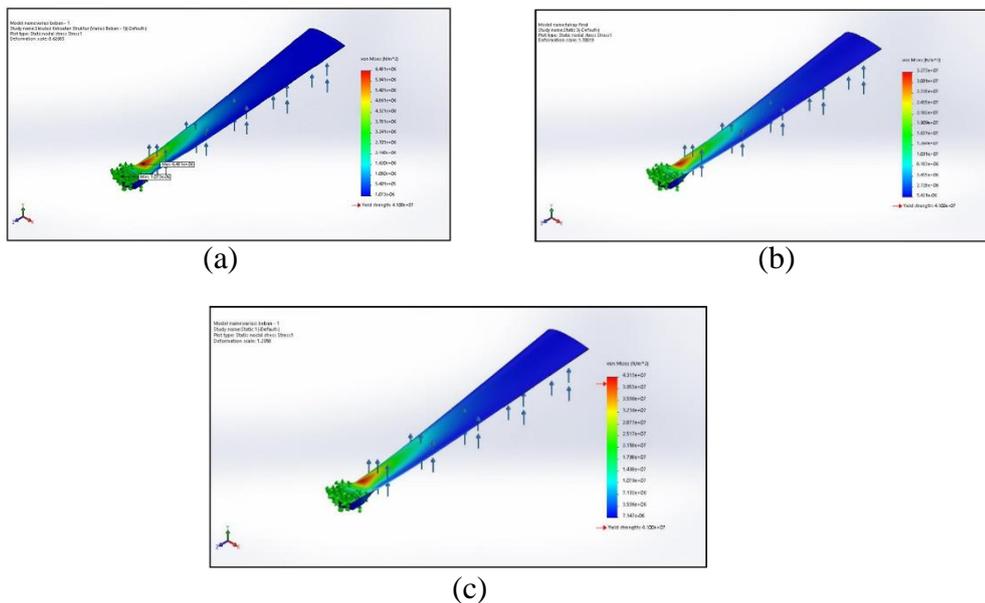
Kemudian setelah merancang bilah dalam model 3D CAD, dilakukan proses simulasi kekuatan struktur dengan material kayu pinus. Pembebanan yang diberikan pada bilah turbin angin merupakan gaya *thrust* yang didapatkan dari *software* Qblade.

Elemen	Jari-Jari Parsial (m)	TSR Parsial	Flow Angle	Twist	Chord (m)
0	0,17	1,49	22,61	12,69	0,12
1	0,23	2,04	17,42	12,25	0,132
2	0,3	2,59	14,07	11,8	0,144
3	0,36	3,14	11,77	11,35	0,156
4	0,42	3,69	10,1	10,91	0,168
5	0,49	4,24	8,84	10,46	0,18
6	0,55	4,80	7,85	10,01	0,192
7	0,61	5,35	7,06	9,56	0,204
8	0,67	5,90	6,42	9,12	0,216
9	0,74	6,45	5,88	8,67	0,228
10	0,8	7	5,42	8,22	0,24



**Gambar 2. 34** Grafik nilai *Thrust* Bilah Turbin Angin terhadap Kecepatan Putar

Ketiga variasi pembebanan yang diberikan adalah sebesar 53,61 N ; 271,2 N ; dan 356,93 N. Secara berurutan pembebanan ini didapatkan dari hasil *thrust* pada kecepatan 4 m/s, 8 m/s, dan 12 m/s. Berdasarkan hasil uji simulasi dengan menggunakan *software* Ansys, didapatkan nilai *equivalent stress* von Mises pada bilah turbin dengan masing-masing pembebanan yakni sebagai berikut.

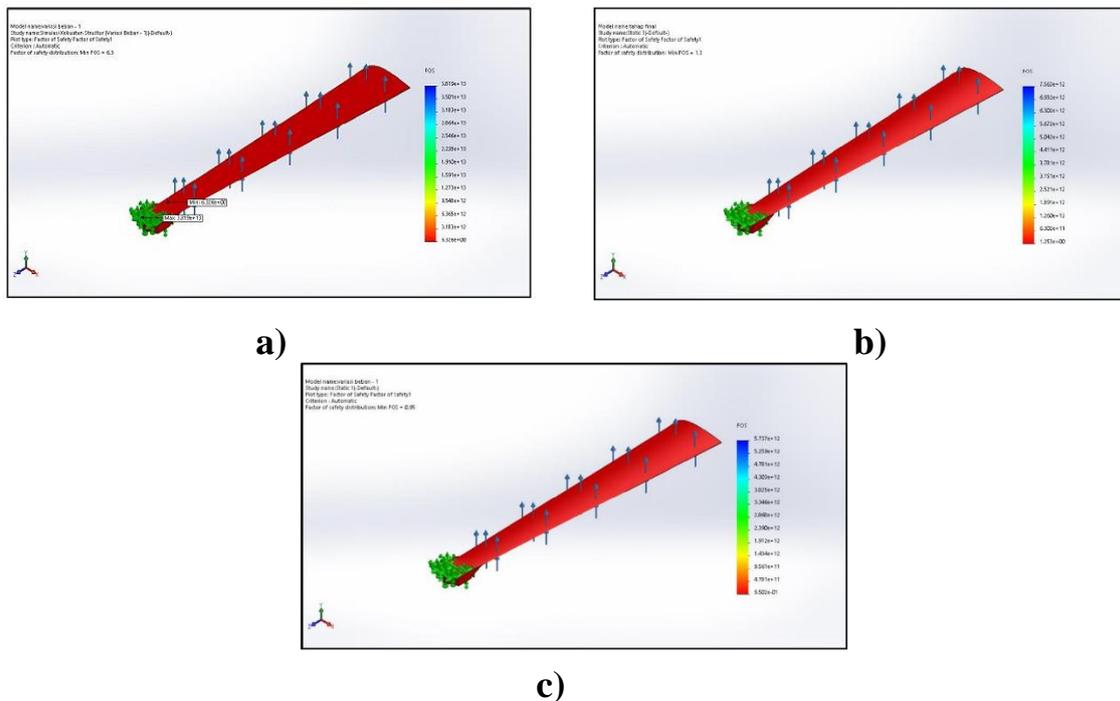


**Gambar 2. 35** Hasil Simulasi Nilai *Equivalent Stress* dengan 3 Variasi Pembebanan (a) Beban 1 (b) Beban 2 (c) Beban 3

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, didapatkan bahwa nilai *equivalent stress* von Mises maksimum sebesar  $6,481 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> dan minimum sebesar  $1,073 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> pada pembebanan pertama (53,61 N). Selanjutnya didapatkan nilai *equivalent stress* von Mises maksimum sebesar  $3,273 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> dan minimum sebesar  $5,421 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> pada

pembebanan kedua (271,2 N). Kemudian, didapatkan nilai *equivalent stress* von Mises maksimum sebesar  $4,315 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  dan minimum sebesar  $7,147 \times 10^{-6}$ .

Setelah mendapatkan nilai *equivalent stress*, dilakukan simulasi untuk mencari nilai *safety factor* dari bilah turbin angin dengan ketiga variasi pembebanan yang telah ditetapkan. Hasil dari *safety factor* didapatkan sebagaimana pada gambar berikut ini.



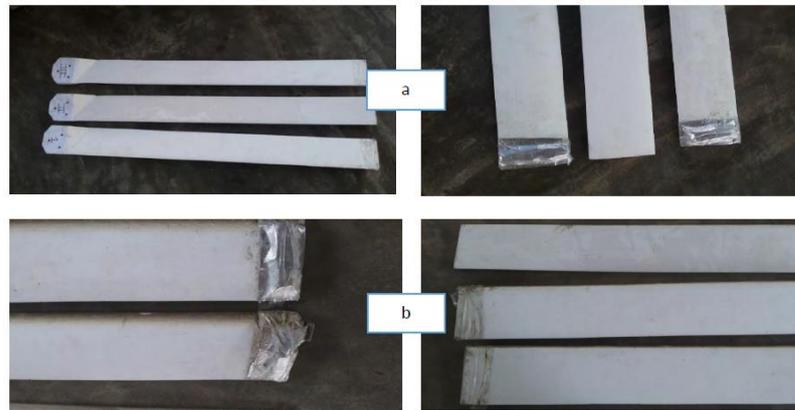
**Gambar 2. 36** Hasil Simulasi *Safety Factor* dengan 3 Variasi Pembebanan

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, diketahui bahwa pada pembebanan pertama (53,61 N), bilah turbin memiliki keamanan yang tinggi dengan nilai *safety factor* sebesar 6,3. Selanjutnya pada pembebanan kedua (271,2 N), didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1,3 sehingga nilai ini masih berada di atas standar *safety factor*. Namun bilah mengalami kegagalan pada pembebanan ketiga (356,93 N), dengan nilai *safety factor* yang didapatkan sebesar 0,95.

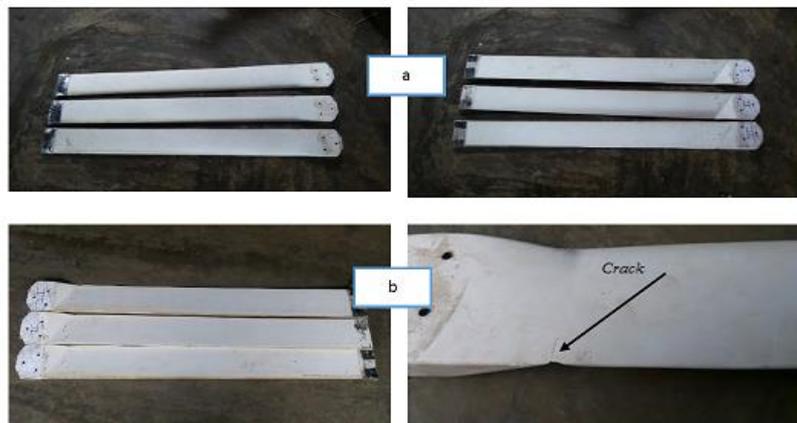
### 2.2.2 Rancang Bangun Baling-Baling Kincir Angin Menggunakan NACA 4412 dan 4415 dari Bahan Kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan Pinus (*Pinus merkusii*) (Dahlan, 2016)

(Dahlan, 2016) dengan penelitiannya yang berjudul “Rancang Bangun Baling-Baling Kincir Angin Menggunakan NACA 4412 dan 4415 dari Bahan Kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan Pinus (*Pinus merkusii*)” bertujuan untuk membuat dan menganalisis kinerja bilah turbin angin dari kayu mahoni dan kayu pinus dengan menggunakan NACA 4412 dan 4415. Pada penelitian ini juga menjelaskan terkait pengujian ketahanan bilah terhadap tumbukan angin pada bilah turbin angin. Penelitian ini dilakukan di Lentera Bumi Nusantara yang merupakan lokasi yang telah ditetapkan oleh penulis di bab sebelumnya. Hasil pengujian ketahanan bilah ini didapatkan bahwa pada bilah dengan material kayu pinus kegagalan terjadi pada perekat penambahan massa. Sedangkan untuk kayu mahoni, kerusakan terjadi pada salah satu bilah kayu setelah pengujian berupa retakan yang terjadi pada bagian pangkal. Berdasarkan hipotesa yang dilakukan oleh (Dahlan, 2016), hal ini terjadi karena karakteristik kayu mahoni yang memiliki massa jenis  $0,61 \text{ g/cm}^3$  ketika beroperasi mengalami beban tumbukan angin dan tidak mampu ditahan oleh salah satu bilah hingga menyebabkan keretakan. Sedangkan untuk kayu pinus memiliki massa jenis  $0,48 \text{ g/cm}^3$  lebih rendah dari pada kayu mahoni sehingga dapat

menahan tumbukan angin terhadap bilah. Salah satu faktor penentuan bahan bilah adalah massa jenis, sedangkan faktor cuaca dapat diatasi dengan *treatment* penguatan dari bahan cat pelapis yang digunakan.



**Gambar 2. 37** Kondisi kayu Pinus Sebelum (a) dan Sesudah (b) Pemasangan



**Gambar 2. 38** Kondisi Kayu Mahoni Sebelum (a) dan Sesudah (b) Pemasangan

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini berlangsung selama 3 hari. Kecepatan angin rata-rata pada hari pertama pada saat pemasangan bilah pinus sedang beroperasi adalah 3,65 m/s namun memiliki kecepatan maksimum sebesar 9,64 m/s. Kemudian pada hari kedua kecepatan angin rata-rata sebesar 2,69 m/s dan kecepatan maksimum sebesar 7,59 m/s. Lalu pada hari ketiga kecepatan angin rata-rata sebesar 1,94 m/s dan kecepatan angin maksimum adalah 9,29 m/s. Berikut ini merupakan gambar data pengujian yang dilakukan

Tanggal		28-10-2015	30-10-2015	5-11-2015
Wind Measurement	Average Wind Speed	3.65 m/s	2.69 m/s	1.94 m/s
	Maximum Wind Speed	9.64 m/s	7.59 m/s	9.29 m/s
	Dominant Wind Direction			
	Teoritical Power	4443.77 Wh	2008.4 Wh	1013.62 Wh
Charging Measurement	Maximum Battery Voltage	26.87 Volt	26.26 Volt	25.75 Volt
	Minimum Battery Voltage	24.33 Volt	23.97 Volt	23.81 Volt
	Maximum Charging Current	15.97 A	12.88 A	14.97 A
Charging Power	Average Charging Wage	60.03 W	24.96 W	37.53 W
	Maximum Charging Wage	254.29 W	321.35 W	377.92 W
	Obtained Power	1440.65 Wh	608.13 Wh	900.84 Wh
Matching Ratio	Obtained power/teoritical power x 100%	32.42 %	30.28 %	88.87 %

**Gambar 2. 39** Hasil Pengolahan Data Kayu Pinus

Setelah dilakukan pengujian bilah pinus selanjutnya dilakukan pengujian bilah mahoni. Kecepatan angin rata-rata pada hari pertama pada saat pemasangan bilah mahoni adalah 1,88 m/s dan kecepatan maksimum sebesar 7,11 m/s. Kemudian pada hari kedua kecepatan angin rata-rata sebesar 2,38 m/s dan kecepatan maksimum sebesar 6,78 m/s. Lalu pada hari ketiga kecepatan angin rata-rata sebesar 2,17 m/s dan kecepatan maksimum sebesar 6,47 m/s. Kecepatan ini lebih rendah bila dibandingkan kecepatan angin pada saat pengujian bilah pinus dikarenakan bertepatan dengan perubahan iklim di daerah penelitian sehingga kecepatan angin mengalami penurunan.

Tanggal		6-11-2015	9-10-2015	10-11-2015
Wind Measurement	Average Wind Speed	1.88 m/s	2.38 m/s	2.17 m/s
	Maximum Wind Speed	7.11 m/s	6.78 m/s	6.47 m/s
	Dominant Wind Direction			
	Teoritical Power	796.29 Wh	1477.75 Wh	1152.33 Wh
Charging Measurement	Maximum Battery Voltage	25.49 Volt	25.67 Volt	25.50 Volt
	Minimum Battery Voltage	23.67 Volt	24.22 Volt	24.01 Volt
	Maximum Charging Current	13.82 A	6.65 A	10.22 A
Charging Power	Average Charging Wage	12.27 W	9.10 W	17.21 W
	Maximum Charging Wage	345.50 W	170.58 W	253.26 W
	Obtained Power	294.40 Wh	218 Wh	412.95 Wh
Matching Ratio		36.97%	14.78%	35.84%

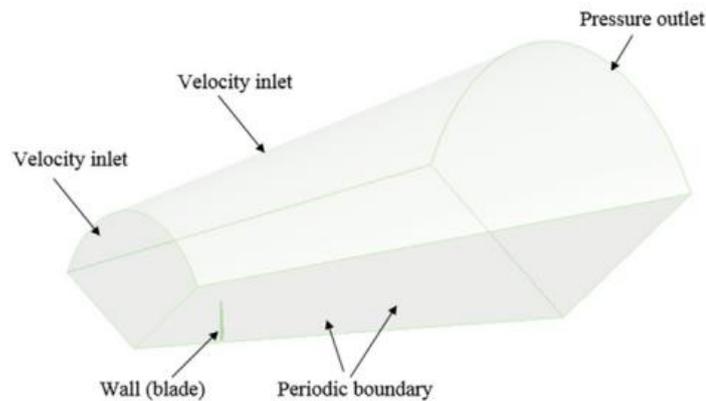
**Gambar 2. 40** Hasil Pengolahan Data Kayu Mahoni

### 2.2.3 Fluid Structure Interaction Modelling of Horizontal-axis Wind Turbine Blades Based on CFD and FEA (Wang, Quant, & Kolios, 2015)

(Wang, Quant, & Kolios, 2015) dengan penelitiannya yang berjudul “*Fluid Structure Interaction Modelling of Horizontal-axis Wind Turbine Blades Based on CFD and FEA*” bertujuan untuk menganalisa kekuatan struktural dari bilah turbin angin dengan spesifikasi turbin angin WindPACT 1,5 MW. Turbin angin ini di desain oleh NREL (National Renewable Energy Laboratory) dengan referensi (Malcolm and Hansen,2002; Griffin, 2001; Malcolm andHansen,2003; ResorandBushnell,2011). Pada penelitian ini simulasi dilakukan dengan metode FSI *one-way coupling*, yang artinya beban aerodinamis dibuat dengan menggunakan model CFD pada *software* Ansys Fluent dan respon kekuatan struktural ditentukan dengan

menggunakan FEA (*Finite Element Analysis*) pada *software* Ansys Static Structural.

Pemodelan CFD diawali dengan pembuatan *domain* dan *boundary conditions* dari bilah turbin angin. Pemodelan dilakukan dengan hanya menggunakan 1 buah bilah saja dalam *domain stream tube* karena model turbin angin simetris terhadap pusat putarannya sehingga waktu yang dibutuhkan untuk simulasi lebih hemat. Hal ini dilakukan dengan cara pembuatan *domain stream tube* radial 120° dengan *periodic boundary*. Pada *domain stream tube* yang dibuat, *velocity inlet* memiliki radius 120 m, dan berjarak 90 m dari bilah serta di set ke *freestream velocity*. Selanjutnya, *pressure outlet* diatur dengan *atmospheric pressure* dengan radius 240 m dan berjarak 350 m dari belakang bilah turbin angin. Bilah dianggap sebagai dinding diam *non-slip*, dan *rotating frame* diterapkan ke semua domain untuk memperhitungkan kecepatan putar dari rotor. Hal ini menghindari kebutuhan untuk menggunakan *rotating mesh* dan memungkinkan masalah *unsteady* dimodelkan menggunakan simulasi *steady-state*, dan secara signifikan mengurangi waktu komputasi.



**Gambar 2. 41** *Domain Stream Tube* dan *Boundary Conditions* pada pemodelan CFD

Proses *meshing* dilakukan pada permukaan seluruh *domain* dan bilah turbin angin. *First layer height* yang digunakan adalah  $4,8 \times 10^{-6}$  m. 4 variasi ukuran *mesh* pada bilah turbin angin yang dilakukan yaitu 0,4 m, 0,2 m, 0,1 m, 0,05 m, dan ukuran *mesh* pada *global surface* yaitu 1,8 m. Dengan melakukan uji konvergensi didapatkan bahwa ukuran *mesh* 0,05 m hanya memiliki 2,51 % *relative error*, akan tetapi menambah jumlah *cell* dari 2,2 juta menjadi 5,5 juta. Untuk itu, ukuran *mesh* yang digunakan adalah 0,1 m pada permukaan bilah. Turbulensi model yang digunakan adalah *k- $\omega$  SST*. *Solution method* yang digunakan adalah *pressured based coupled algorithm* dikarenakan kecepatan fluida tidak melebihi 0,3 Mach dan fluida dianggap sebagai *incompressible-low velocity*.

Item	Cell face size at blade surfaces			
	0.4 m	0.2 m	0.1 m	0.05 m
Rotor torque [Nm]	199,002	283,416	347,490	356,431
Total number of elements	997,219	1,273,460	2,178,899	5,460,679

**Gambar 2. 42** Hasil Simulasi CFD dan Jumlah Noda pada Setiap Ukuran *Mesh*

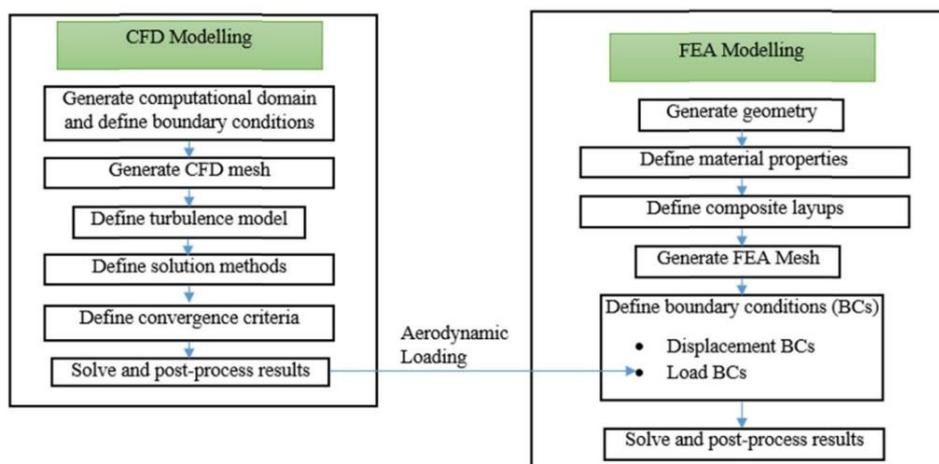
Pada pemodelan FEA, bilah turbin angin dibuat dengan menggunakan *software* Ansys Static Structural. Geometri bilah turbin angin 1,5 MW WindPACT dibuat berdasarkan informasi bentuk aerodinamis yang sebelumnya telah diteliti oleh (Malcolm and Hansen,2002;

Griffin, 2001; Malcolm and Hansen, 2003; Resor and Bushnell, 2011). Bilah turbin angin ini terdiri atas 5 macam material, yaitu *gel coat*, *random mat*, *CDB340 triaxial fabric*, kayu balsa, dan spar cap komposit dengan *material properties* masing-masing sebagai berikut.

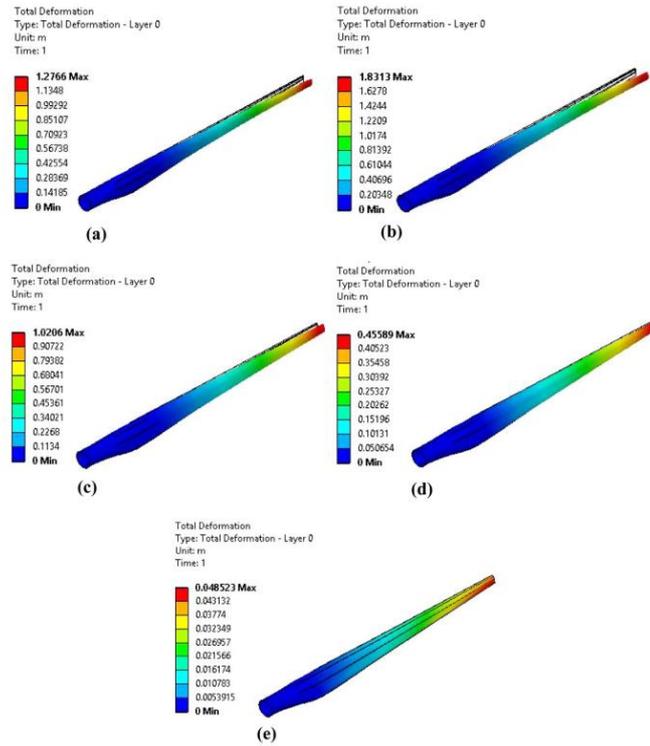
Material	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)	$\nu_{xy}$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Gel coat	3.44	3.44	1.38	0.3	1230
Random mat	9.65	9.65	3.86	0.3	1670
CDB340 triaxial fabric	24.2	8.97	4.97	0.39	1700
Balsa	2.07	2.07	0.14	0.22	144
Spar cap mixture	27.1	8.35	4.7	0.37	1700

**Gambar 2. 43** *Material Properties* Turbin Angin 1,5 MW WindPACT

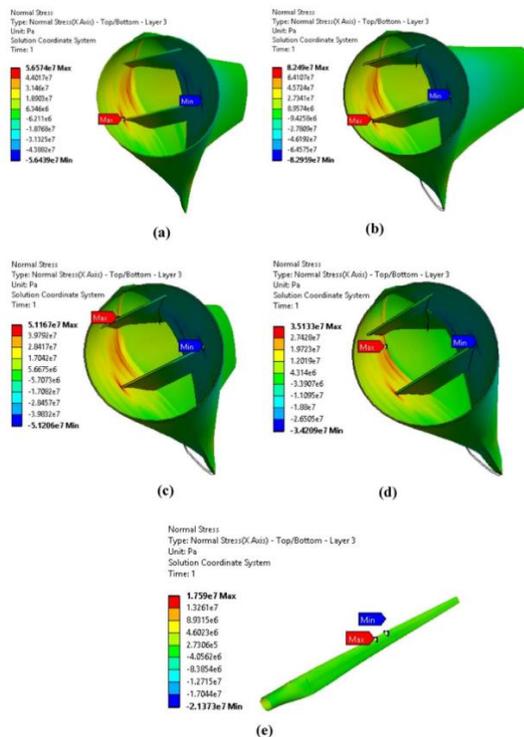
Selanjutnya hasil *pressure distribution* yang telah didapatkan melalui proses pemodelan CFD pada Ansys Fluent akan diimpor ke pemodelan FEA. Lalu, proses pemodelan FEA akan dilanjutkan dengan penentuan *boundary condition*. Beban tambahan diterapkan dalam proses *boundary condition* ini, yaitu dengan menambahkan gaya sentrifugal yang terjadi akibat perputaran bilah turbin angin. Kemudian, *fixed support* ditentukan pada pangkal bilah. Metode *fluid structure interaction* yang diterapkan pada penelitian ini adalah dengan menggunakan *one-way coupling*. Skema dari FSI *one-way coupling* adalah sebagaimana gambar dibawah ini.



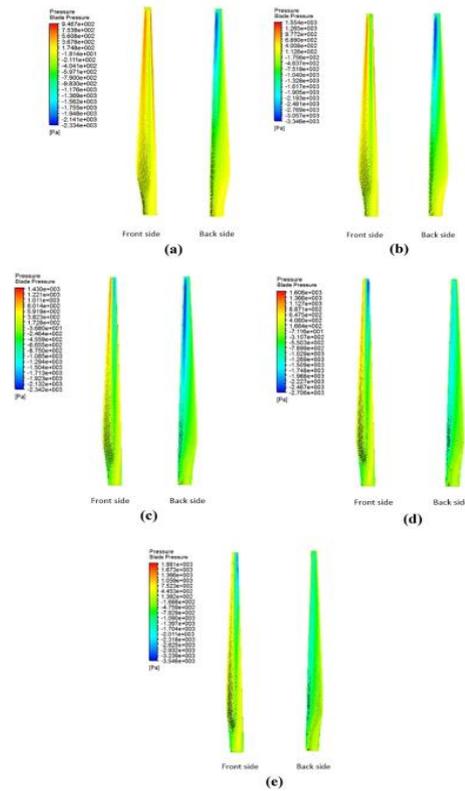
**Gambar 2. 44** Skematik FSI *one-way coupling*



**Gambar 2. 45** Defleksi bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s



**Gambar 2. 46** Distribusi tegangan normal bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s



**Gambar 2. 47** Distribusi tekanan pada bilah pada kecepatan angin (a) 8 m/s, (b) 12 m/s, (c) 16 m/s, (d) 20 m/s, (e) 24 m/s

#### 2.2.4 Fatigue of sisal fibre reinforced composites : Constant-life diagrams and hysteresis loop capture (Towo & Ansell, 2008)

(Towo & Ansell, 2008) dengan penelitiannya yang berjudul “*Fatigue of sisal fibre reinforced composites : Constant-life diagrams and hysteresis loop capture*” bertujuan untuk mengetahui kegagalan fatik pada serat sisal sebagai penguat komposit. Dalam penelitian ini, fokus utama yang dilakukan adalah untuk mengetahui kegagalan fatik dari serat sisal. Namun, pada jurnal ini juga menjelaskan eksperimen yang dilakukan untuk mendapatkan nilai kekuatan dari campuran serat sisal-*polyester* dan campuran serat-sisal *epoxy* baik dengan *treatment* maupun tanpa *treatment*. *Treatment* yang dimaksud disini adalah memberikan perlakuan terhadap serat sisal dengan 0,06 M larutan NaOH.

Komposit dibuat dengan menuang polimer kedalam cetakan panas bertekanan. Masing-masing spesimen berisi 12 g serat sisal yang dibagi menjadi tiga lapis. Setelah lapisan pertama ditata pada cetakan, polimer dituangkan, demikian seterusnya hingga lapisan yang ketiga. Pembuatan komposit sisal-*polyester* ini dilakukan pada suhu 50°C dengan tekanan 60 bar selama 20 menit, dilanjutkan dengan pemanasan pada suhu 80°C selama semalam. Sedangkan pembuatan komposit sisal-*epoxy* dibuat dengan pemanasan pada suhu 80<sup>0</sup> dengan tekanan 60 bar selama 20 menit. Pengerjaan selanjutnya dalah dilakukan pada suhu 23±1° selama 23 jam dan kemudian dipanaskan pada 100°C selama 4 jam. Berikut ini fraksi *volume* yang digunakan dalam eksperimen dan hasil kekuatan dari serat sisal-*polyester* dan serat sisal-*epoxy* baik dengan *treatment* maupun tanpa *treatment*.

Jenis Komposit	Fraksi Volume	Standar Deviasi
Sisal-polyester tanpa <i>treatment</i>	68.2	3.2
Sisal-polyester dengan <i>treatment</i>	64.4	1.9
Sisal-epoxy tanpa <i>treatment</i>	71.5	2.5
Sisal-epoxy dengan <i>treatment</i>	68.5	1.5

**Gambar 2. 48** Fraksi Volume dari Masing-Masing Komposit

Jenis Komposit	Kekuatan (MPa)
Sisal-polyester tanpa <i>treatment</i>	222.6
Sisal-polyester dengan <i>treatment</i>	286.0
Sisal-epoxy tanpa <i>treatment</i>	329.8
Sisal-epoxy dengan <i>treatment</i>	335.4

**Gambar 2. 49** Gambar Sifat komposit serat sisal-*polyester* dan serat sisal-*epoxy* baik dengan *treatment* maupun tanpa *treatment*

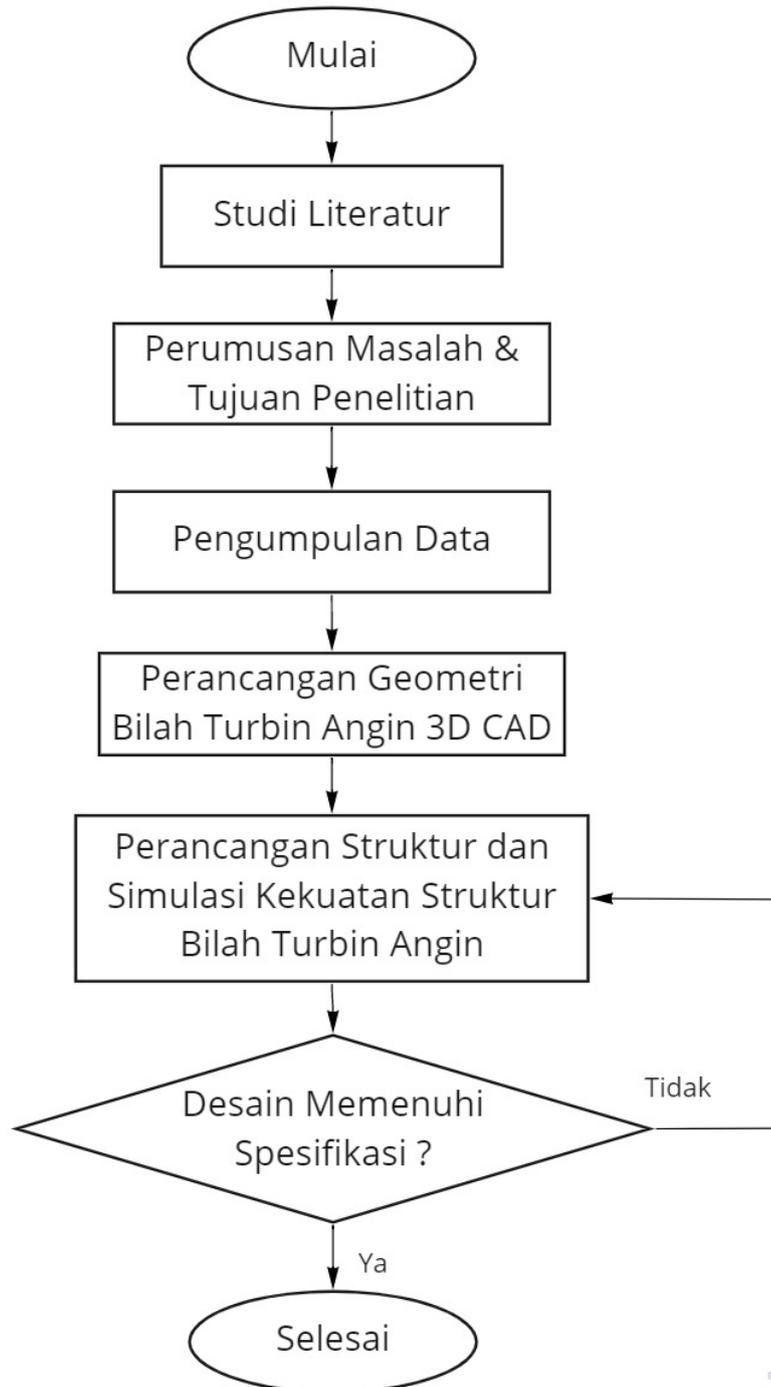
Berdasarkan gambar diatas, ditunjukkan bahwa data kekuatan tarik komposit serat sisal baik yang diberi *treatment* maupun tanpa *treatment*. Hasilnya menunjukkan bahwa pemberian perlakuan serat sisal dengan 0,06 M larutan NaOH akan meningkatkan kekuatan tarik komposit sisal-*polyester*, namun tidak memberikan peningkatan yang berarti pada komposit serat *sisal-epoxy*.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap dan perlu dilakukan pemahaman terhadap metode-metode agar memperoleh hasil yang diinginkan. Metode pengerjaan penelitian tugas akhir akan dijelaskan secara garis besar pada diagram alir penelitian. Penjelasan secara rinci mengenai diagram alir penelitian adalah sebagai berikut.



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

miro

### 3.2 Studi Literatur

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk mendalami landasan teori yang akan digunakan pada penelitian ini. Studi literatur dimulai dengan mempelajari jurnal-jurnal penelitian sebelumnya yang meneliti tentang topik yang sejenis, yaitu mengenai dinamika, simulasi, proses perancangan pada bilah turbin angin, dan material-material natural komposit. Studi literatur ini kemudian dilanjutkan dengan mempelajari beberapa textbook serta video tutorial desain dasar perancangan bilah turbin angin, *software* elemen hingga, perancangan material natural komposit, dan analisis kegagalan material.

### 3.3 Perumusan Masalah & Tujuan Penelitian

Rumusan masalah ditetapkan untuk mengidentifikasi langkah yang harus dilakukan agar mencapai tujuan dari suatu penelitian. Rumusan masalah diperoleh dari studi literatur dan lapangan yang telah dilakukan sebagaimana yang telah ditampilkan pada BAB I.

### 3.4 Pengumpulan Data *Material Properties*

Pada tahap ini, diambil data *material properties* dari kayu mahoni, serat sisal, dan *epoxy* resin dari studi literatur yang telah dilakukan untuk menunjang proses simulasi. Adapun untuk *material properties* dari kayu mahoni, serat sisal, dan *epoxy* resin dapat diambil dari BAB II.

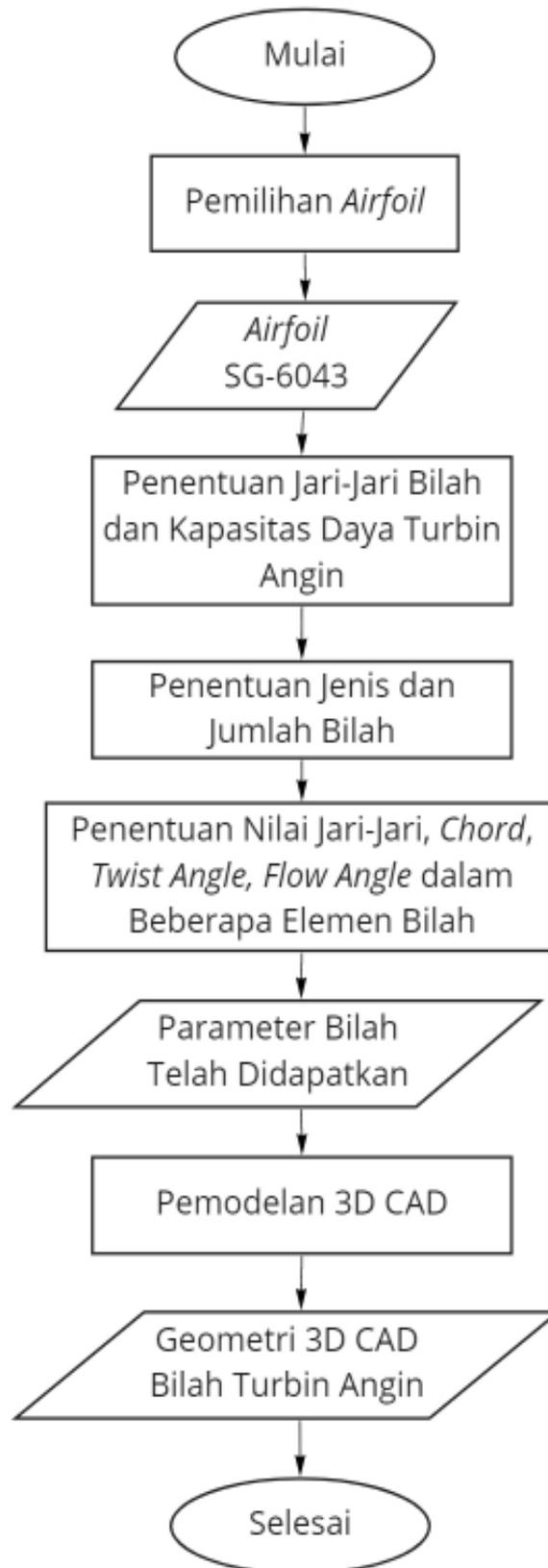
**Tabel 3. 1 *Material Properties* Serat Sisal**

Properties	
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	1450
<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)	530
Modulus Young (GPa)	9,4
Poisson's <i>Ratio</i>	0,32
<i>Compressive Strength</i> (MPa)	33,6
<i>Shear Strength</i> (MPa)	19,1

**Tabel 3. 2 *Material Properties* Resin Epoxy**

Properties	
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	1160
<i>Ultimate Tensile Strength</i> (MPa)	97
Modulus Young (GPa)	3,78
Poisson's <i>Ratio</i>	0,35
<i>Compressive Strength</i> (MPa)	104
<i>Shear Strength</i> (MPa)	40

### 3.5 Diagram Alir Perancangan Geometri Bilah Turbin Angin

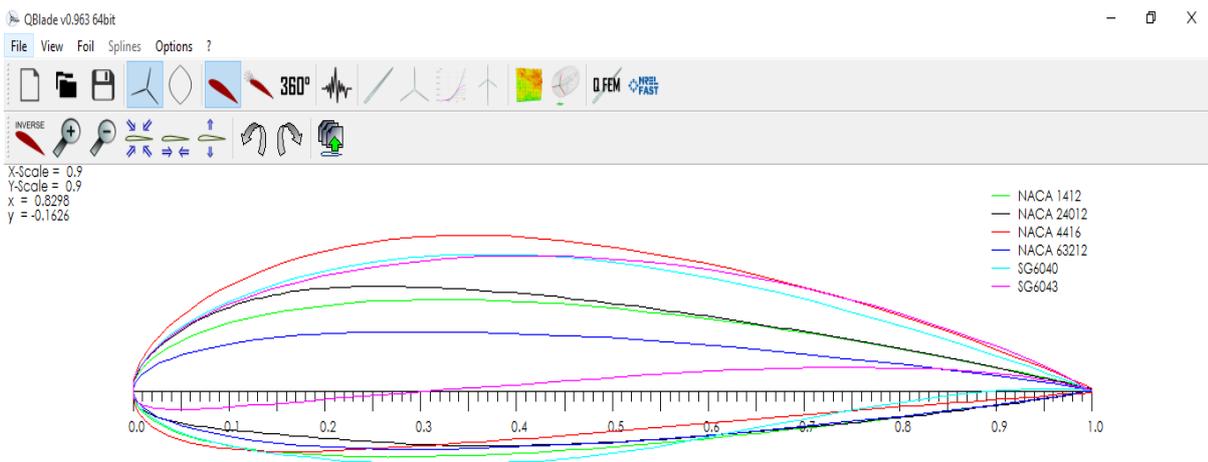


**Gambar 3. 2** Diagram Alir Perancangan Geometri Bilah Turbin Angin

### 3.6 Perancangan dan Pemodelan 3D CAD

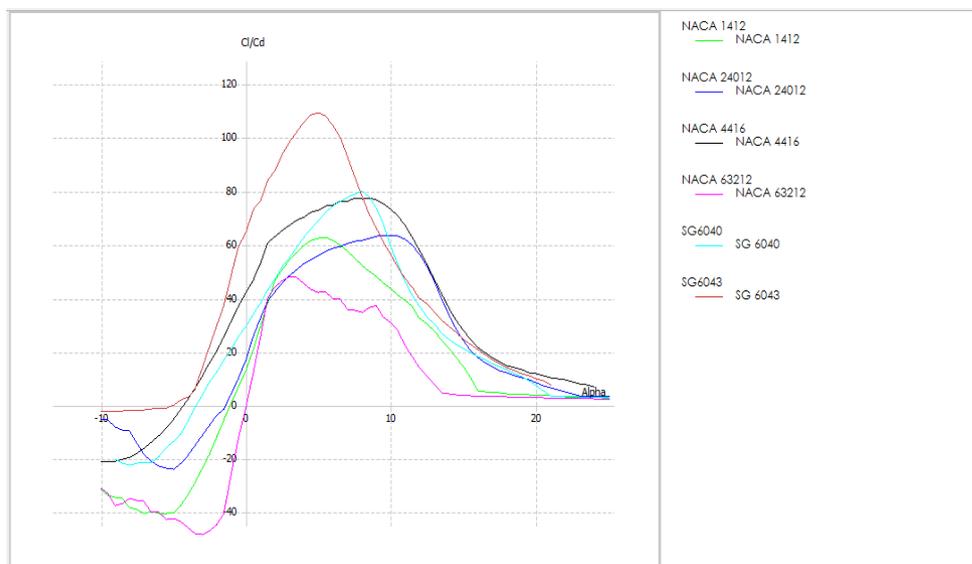
#### 3.6.1 Pemilihan Airfoil

Langkah pertama dalam melakukan perancangan bilah adalah melakukan pemilihan *airfoil* dengan membandingkan beberapa *airfoil*. Kemudian *airfoil* tersebut akan dianalisis nilai dari  $C_l/C_d$  terhadap sudut  $\alpha$ . Dalam penelitian ini, penulis menganalisis jenis *airfoil* NACA 4 digit, NACA 5 digit, dan Famili Selig/Giguere (SG). *Airfoil* yang dianalisis diantaranya adalah NACA 4416, 1412, 63212, 24012, SG-6043, dan SG-6040. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan *software* Qblade dengan memilih modul *airfoil design*. Selanjutnya, nomor seri *airfoil* NACA dan SG diinput pada NACA foils yang merupakan tampilan dari menu *foil*. Pemodelan *airfoil* yang akan dianalisis akan ditampilkan seperti pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3. 3** Pemodelan beberapa *airfoil* yang akan dianalisis

Proses analisis kemudian dilanjutkan pada modul *XFOIL direct analysis* yang akan menampilkan kurva  $C_l/C_d$  terhadap  $\alpha$  dari masing-masing *airfoil* seperti pada gambar dibawah.



**Gambar 3. 4** Grafik Analisis Perbandingan  $C_l/C_d$  terhadap nilai Alpha pada X-FOIL

Hasil analisis menunjukkan bahwa *airfoil* NACA 1412 memiliki nilai  $Cl/Cd$  sebesar 62,7 pada  $\alpha$  5,5 ; NACA 24012 memiliki nilai  $Cl/Cd$  sebesar 63,5 pada  $\alpha$  10 ; NACA 4416 memiliki nilai  $Cl/Cd$  sebesar 77,3 pada  $\alpha$  8,5 ; NACA 63212 memiliki nilai  $Cl/Cd$  sebesar 48,1 pada  $\alpha$  3 ; SG 6040 memiliki nilai  $Cl/Cd$  sebesar 79,8 pada  $\alpha$  8 ; dan SG 6043 memiliki nilai  $Cl/Cd$  sebesar 109,1 pada  $\alpha$  5. Dari hasil perbandingan beberapa *airfoil* diatas, SG-6043 memiliki nilai  $Cl/Cd$  tertinggi. Berdasarkan hasil analisis ini, maka *airfoil* yang akan penulis gunakan dalam penelitian ini adalah *airfoil* SG-6043.

### 3.6.2 Penentuan Parameter Bilah

Tahapan selanjutnya adalah melakukan penentuan parameter bilah agar mengetahui perancangan geometri bilah yang diinginkan. Berikut ini langkah-langkah yang dilakukan dalam penentuan parameter bilah :

#### 1. Jari-Jari Bilah dan Kapasitas Daya Turbin Angin

**Tabel 3. 3** Parameter Pertama dalam Perancangan Bilah Turbin Angin

Kapasitas Daya Listrik	Efisiensi					Daya Angin	V Avg	Luas Sapuan	Jari-Jari
	Bilah	Transmisi	Generator	Controller	Sistem				
Watt	%	%	%	%	%	Watt	m/s	m	m

- a. Langkah pertama adalah menentukan kapasitas dan efisiensi sistem. Efisiensi sistem ini terdiri atas efisiensi bilah, efisiensi transmisi, efisiensi generator, dan efisiensi kontroler. Yang dimana efisiensi bilah yang diinginkan oleh penulis adalah berkisar antara 0.35 – 0.4, efisiensi transmisi sebesar 1, efisiensi generator sebesar 0,9. Maka dari itu, efisiensi sistem secara keseluruhan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$K = \eta_{bilah} \cdot \eta_{generator} \cdot \eta_{transmisi} \cdot \eta_{controller} \dots \dots \dots (3.1)$$

- b. Menentukan jari-jari yang akan digunakan dengan mengetahui luas sapuan bilah, daya angin yang diperoleh, massa angin, dan kecepatan angin rata-rata. Daya angin dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3.2) dan kapasitas daya listrik dalam perancangan ini adalah sebesar 500 Watt. Setelah daya angin diperoleh, maka luas sapuan bilah turbin dapat ditentukan dengan persamaan (3.3). Dengan beberapa parameter yang telah ditetapkan dari awal, yaitu : kecepatan angin rata-rata adalah 9 m/s dan massa jenis udara.

$$W_a = \frac{W_e}{Efisiensi\ sistem} \dots \dots \dots (3.2)$$

$$Luas\ Sapuan\ Bilah\ (A) = 2 \cdot \frac{W_a}{\rho \cdot v^3} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots \dots \dots (3.4)$$

## 2. Jenis dan Jumlah Bilah

**Tabel 3. 4** Parameter Kedua dalam Perancangan Bilah Turbin Angin

TSR	<i>Airfoil</i>	Cl/Cd	Alpha	Cl	Jumlah Bilah

- c. Dalam parameter kedua ini, langkah yang dilakukan adalah menentukan jenis bilah, jumlah bilah, dan *airfoil* sesuai dengan keperluan perancangan. Analisis nilai Cl/Cd pada *airfoil* yang digunakan dapat diperoleh dari kurva hasil analisis menggunakan *Software Qblade*. Berdasarkan analisis pada *software Qblade* didapatkan nilai Cl sebesar 1,26 dan nilai Cl/Cd sebesar 109,1 pada nilai Alpha 5. Berdasarkan literatur, TSR untuk bilah turbin angin berjumlah 3 berkisar antara nilai 7 – 9 (Ingram, 2011). Dalam penelitian ini, TSR yang digunakan yaitu sebesar 7.

## 3. Jari-Jari, Chord, *Twist Angle*, *Flow Angle* Parsial

**Tabel 3. 5** Parameter Ketiga dalam Perancangan Bilah Turbin Angin

Elemen	Jari-Jari Parsial	TSR Parsial	Flow Angle	Twist (Beta degree)	Chord	Twist Linearisasi	Twist Linearisasi 75%	Chord Linearisasi 75%	Chord Linearisasi 75%
0									
1									
...									
n									

- d. Dalam parameter ketiga ini, langkah yang dilakukan adalah membagi bilah turbin angin menjadi n-elemen agar memudahkan perhitungan geometri bilah. Dalam penelitian ini, jumlah elemen bilah akan dibagi sebanyak 11 elemen.
- e. Menghitung jari-jari parsial. Panjang elemen 0 atau pada bagian pangkal bilah disesuaikan dengan generator TSD 500 Watt, yaitu sebesar 0,18 meter. Panjang 0,18 meter ini biasa disebut sebagai *innermost station* dan R adalah jari-jari yang digunakan. Kemudian untuk elemen-elemen selanjutnya akan disesuaikan agar memiliki panjang yang sama untuk setiap elemennya. Total panjang elemen bilah harus sesuai dengan jari-jari yang telah ditetapkan dalam perancangan. Maka, jari-jari parsial dapat ditentukan dengan persamaan :

$$r_{parsial} = innermost\ station + \left[ \left( \frac{R - innermost\ station}{n} \right) n_{parsial} \right] \dots \dots (3.5)$$

- f. Selanjutnya adalah penentuan *Tip Speed Ratio* (TSR) parsial dan *flow angle*. TSR parsial dapat ditentukan dengan persamaan (3.6) dan *flow angle* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3.7).

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \lambda_R \dots \dots \dots (3.6)$$

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \dots \dots \dots (3.7)$$

- g. Langkah selanjutnya adalah penentuan lebar *chord*. Lebar dari *chord* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3.8). Kemudian setelah didapatkan lebar chord, maka akan dilakukan proses linearisasi lebar chord dengan tujuan agar transisi chord pada

bilah menjadi linear dan mudah untuk dimanufaktur. Linearisasi ini dilakukan pada lebar chord elemen 0 (bagian pangkal bilah) dan pada lebar chord elemen 10 (bagian ujung bilah). Penulis menggunakan lebar chord 0,12 m pada bagian pangkal bilah dan lebar chord 0,03 m pada bagian ujung bilah.

$$C_r = \frac{16\pi R \left(\frac{R}{r}\right)}{9\lambda^2 B C_l} \dots\dots\dots(3.8)$$

- h. Menentukan *twist* bilah dengan menggunakan persamaan (3.9). Selanjutnya, dilakukan proses linearisasi *twist* agar geometri bilah lebih rapi. Linearisasi dilakukan pada 75% panjang bilah atau pada elemen ke-7 dan ke-8 (Inayah, 2020). Proses linearisasi ini akan dilakukan dengan menggunakan microsoft Excel.

$$\beta = \phi - \alpha \dots\dots\dots(3.9)$$

### 3.6.3 Pemodelan 3D CAD

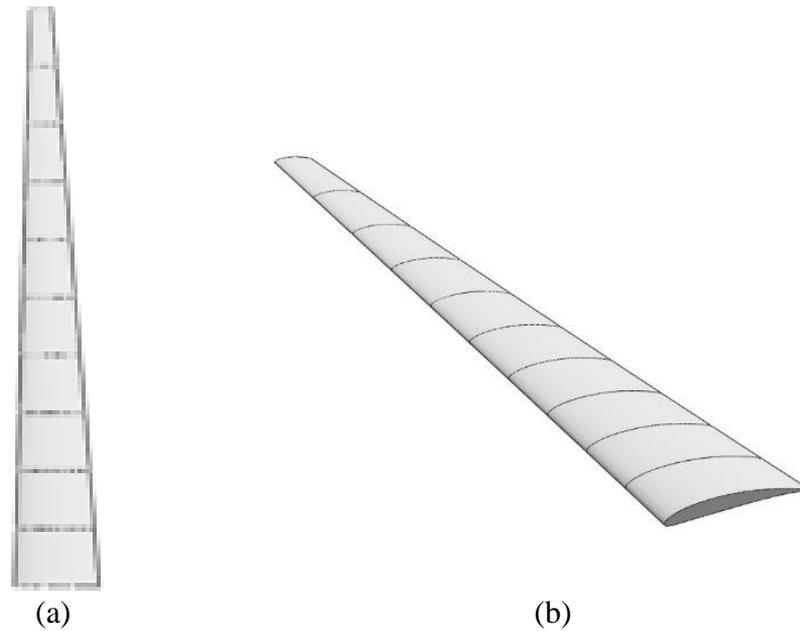
Dalam pembuatan model 3D ini, penulis menggunakan *software* Qblade dan Solidworks. *Software* Qblade berfungsi untuk mendapatkan titik koordinat yang selanjutnya titik koordinat ini akan digunakan dalam perancangan model 3D bilah pada *Solidworks*.

- a. Langkah pertama dilakukan pada *Software* Qblade dengan menginput parameter-parameter yang telah ditentukan pada langkah sebelumnya. Gambar dibawah ini merupakan proses penginputan parameter pada *software* Qblade.

HAWT

	Pos (m)	Chord (m)	Twist	Foil	Polar
1	0,18	0,12	7,745	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
2	0,262	0,111	6,975	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
3	0,344	0,102	6,205	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
4	0,426	0,093	5,435	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
5	0,508	0,084	4,665	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
6	0,59	0,075	3,895	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
7	0,672	0,066	3,125	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
8	0,754	0,057	2,36	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
9	0,836	0,048	1,585	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
10	0,918	0,039	0,815	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M
11	1	0,03	0,045	SG6043	T1_Re0.250_M0.00_N9.0 360 M

**Gambar 3. 5** Proses Penginputan Parameter pada *Software* Q-Blade



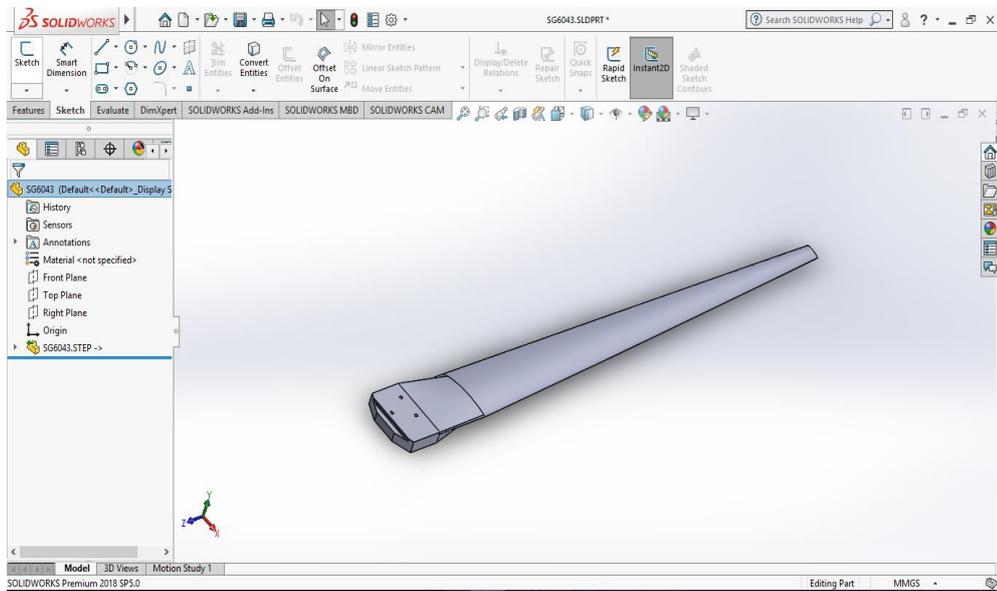
**Gambar 3. 6** 3D CAD Bilah Turbin Angin dengan Menggunakan *Software* Q-Blade (a) tampak atas (b) tampak isometrik

- b. Langkah selanjutnya adalah mengekspor nilai koordinat bilah dalam pemodelan 3D yang didapatkan dari *Software* Qblade ke Solidworks. Setelah nilai koordinat telah diekspor, melakukan pembuatan 3 kolom yang terdiri atas kolom x,y, dan z pada Microsoft Excel. Kemudian data koordinat disalin dan diinput pada kolom x dan y untuk semua elemen. Sedangkan pada kolom z pada elemen ke-0 diisi dengan angka 0 dan untuk kolom z pada elemen ke-1 hingga elemen ke-10 dapat diperoleh dengan menghitung selisih nilai jari-jari parsial pada setiap elemen dengan nilai jari-jari parsial pada elemen ke-0. Data koordinat yang didapatkan, ditunjukkan pada gambar dibawah ini.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2	Elemen 0				Elemen 1				Elemen 2		
3	X	Y	Z		X	Y	Z		X	Y	Z
4	100	0	0		100	0	-82		100	0	-164
5	998.105	0,455556	0		998.105	0,455556	-82		998.105	0,455556	-164
6	992.735	1,883333	0		992.735	1,883333	-82		992.735	1,883333	-164
7	984.387	4,216667	0		984.387	4,216667	-82		984.387	4,216667	-164
8	973.434	10.465	0		973.434	10.465	-82		973.434	10.465	-164
9	960.071	15.523	0		960.071	15.523	-82		960.071	15.523	-164
10	944.288	20.916	0		944.288	20.916	-82		944.288	20.916	-164
11	925.966	26.547	0		925.966	26.547	-82		925.966	26.547	-164
12	905.161	32.475	0		905.161	32.475	-82		905.161	32.475	-164
13	882.072	38.683	0		882.072	38.683	-82		882.072	38.683	-164
14	856.884	45.099	0		856.884	45.099	-82		856.884	45.099	-164
15	829.794	51.648	0		829.794	51.648	-82		829.794	51.648	-164
16	801.008	5.824	0		801.008	5.824	-82		801.008	5.824	-164
17	770.741	64.777	0		770.741	64.777	-82		770.741	64.777	-164
18	739.215	71.138	0		739.215	71.138	-82		739.215	71.138	-164
19	706.663	77.173	0		706.663	77.173	-82		706.663	77.173	-164
20	673.195	82.684	0		673.195	82.684	-82		673.195	82.684	-164
21	638.892	87.606	0		638.892	87.606	-82		638.892	87.606	-164
22	603.962	91.903	0		603.962	91.903	-82		603.962	91.903	-164
23	568.537	95.505	0		568.537	95.505	-82		568.537	95.505	-164
24	532.761	98.415	0		532.761	98.415	-82		532.761	98.415	-164
25	496.847	100.592	0		496.847	100.592	-82		496.847	100.592	-164
26	460.955	10.201	0		460.955	10.201	-82		460.955	10.201	-164
27	425.276	10.269	0		425.276	10.269	-82		425.276	10.269	-164
28	389.995	102.599	0		389.995	102.599	-82		389.995	102.599	-164

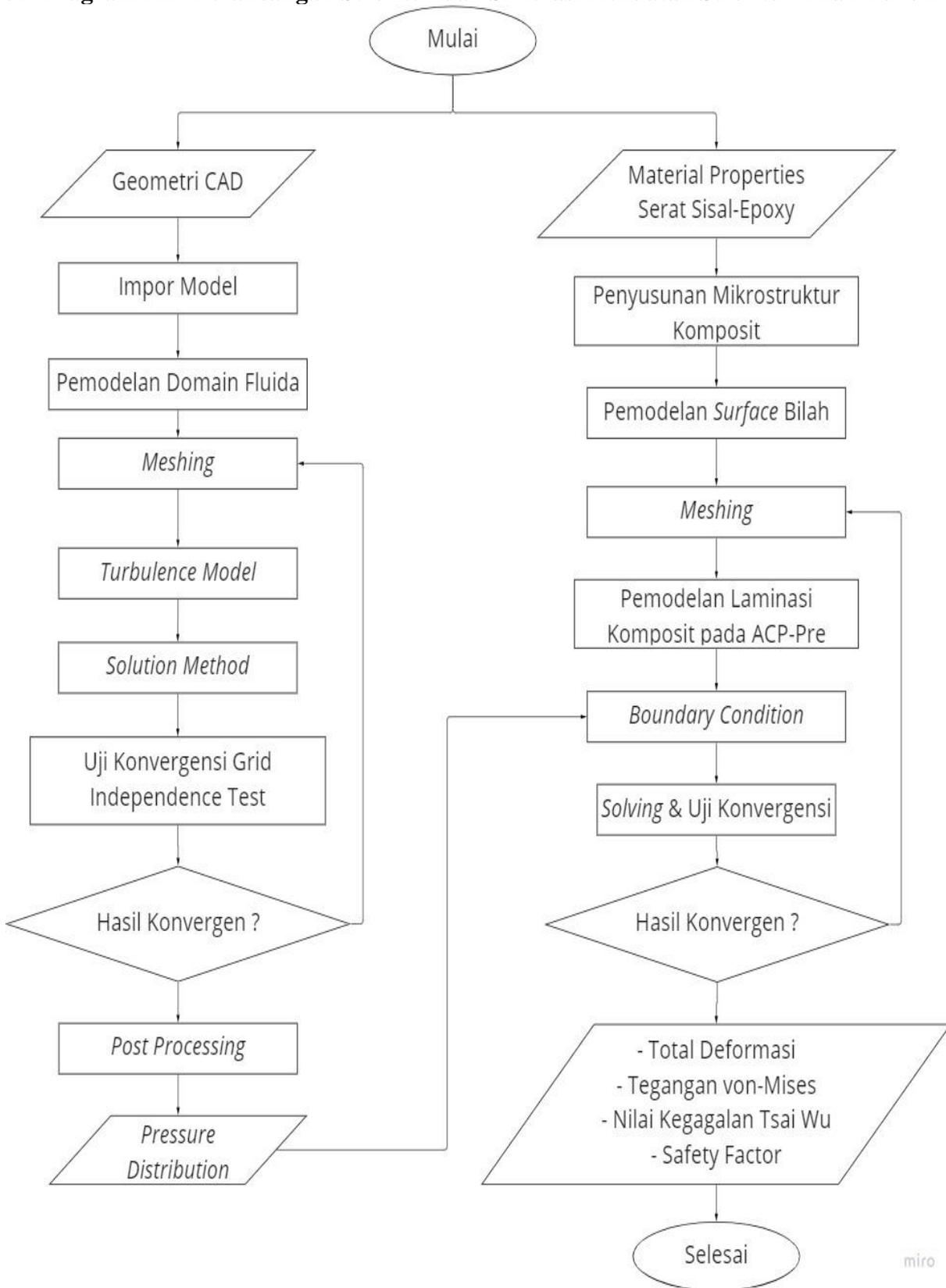
**Gambar 3.7** Data Koordinat yang didapatkan dari hasil Impor *Software* Q-blade ke Excel

- c. Kemudian, setelah didapatkan koordinat. Maka desain 3D bilah turbin angin *taper* pada *software* Solidworks akan didapatkan sebagaimana gambar dibawah ini.



**Gambar 3. 8** Geometri 3D CAD Menggunakan *Software* Solidworks

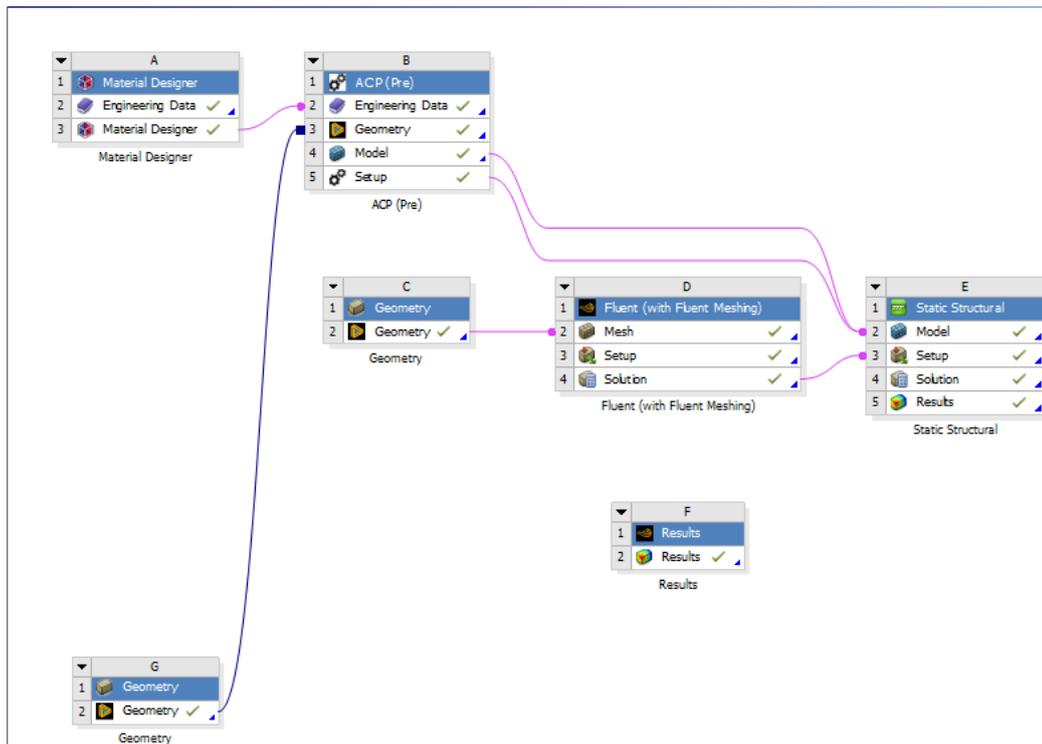
### 3.7 Diagram Alir Perancangan Struktur dan Simulasi Kekuatan Struktur Bilah Turbin



**Gambar 3. 9** Diagram Alir Perancangan Struktur dan Simulasi Kekuatan Struktur Bilah Turbin

### 3.8 Pemodelan Numerik Simulasi Kekuatan Struktur Bilah

Dalam proses ini dilakukan uji simulasi kekuatan struktur bilah turbin dengan rancangan struktur bilah turbin menggunakan material komposit serat sisal-*epoxy*. Proses ini berlangsung dengan menggunakan *software* Ansys Fluent, Ansys ACP *Pre-Post*, dan Ansys Static Structural. Ansys Fluent berfungsi untuk memodelkan CFD terlebih dahulu untuk mendapatkan *pressure distribution* pada bilah yang dihasilkan oleh angin. Kemudian *pressure distribution* yang didapatkan di Ansys Static Structural berfungsi untuk mengetahui kekuatan struktur pada bilah dengan menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)*. ACP *Pre-Post* berfungsi untuk memodelkan mikrostruktur dan makrostruktur dari material komposit serat sisal-*Epoxy*.

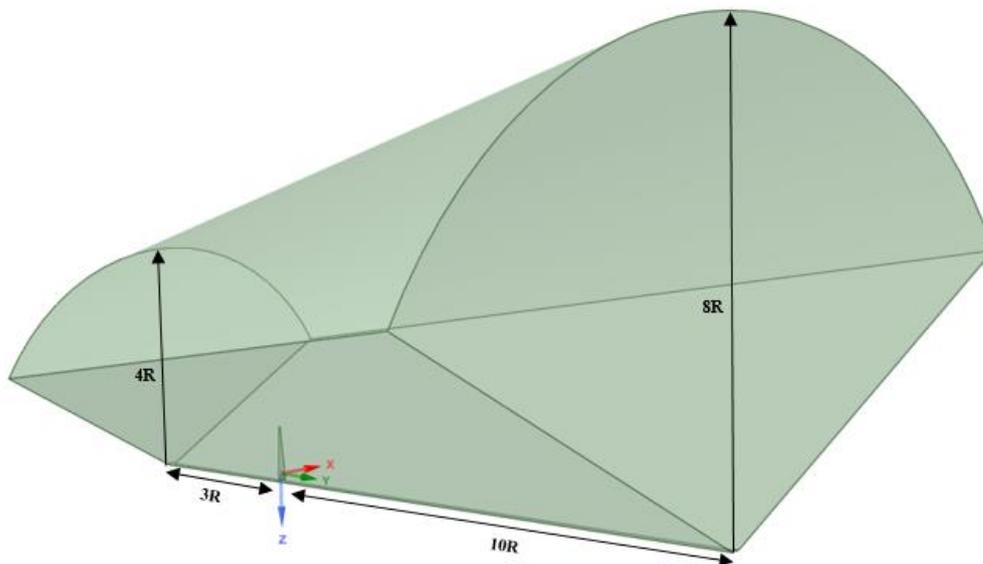


Gambar 3. 10 Workflow Pemodelan Numerik Simulasi Kekuatan Struktur Bilah Turbin

#### 3.8.1 Simulasi Computational Fluid Dynamics

##### 1. Pemodelan Domain Fluida

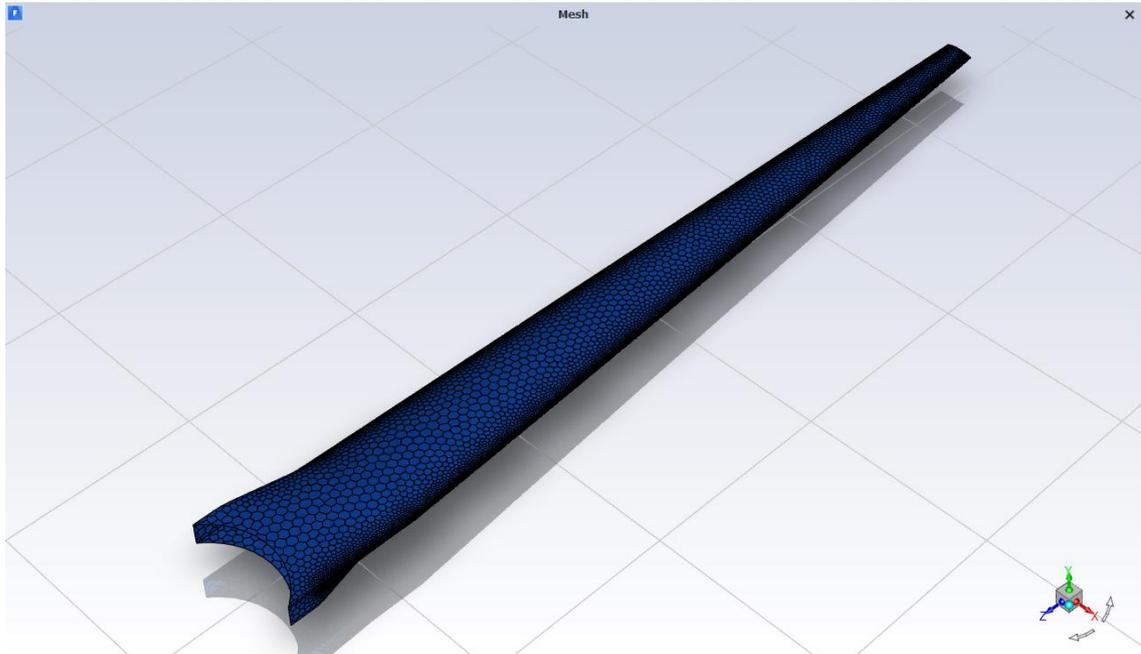
Pemodelan domain fluida ini dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys Spaceclaim. Tujuan dari pemodelan domain fluida ini adalah untuk membuat model turbin angin yang simetris terhadap pusat putarannya. Pada proses pembuatan domain fluida ini, bilah turbin yang awalnya berjumlah 3 akan dimodelkan dengan menggunakan 1 bilah saja. Proses ini dilakukan dengan menjadikan 1 bilah dalam segmen domain *stream tube* dengan radial  $120^\circ$  dengan *periodic boundary A* dan *periodic boundary B*. Proses pengurangan jumlah bilah ini berfungsi untuk mengurangi waktu dalam simulasi. Metode ini biasa disebut dengan *rotating frame motion*. Radius domain fluida yang digunakan pada bagian *inlet* dan *outlet* adalah 4 meter dan 8 meter. Bagian permukaan depan dari domain merupakan *velocity inlet* yang berjarak 3 meter dari depan bilah sebagai tempat masuk *freestream velocity*, dan permukaan bagian belakang domain merupakan *pressure outlet* yang berjarak 10 meter dari belakang bilah. Kemudian permukaan kiri dan kanan merupakan permukaan yang akan ditetapkan menjadi *boundary*.



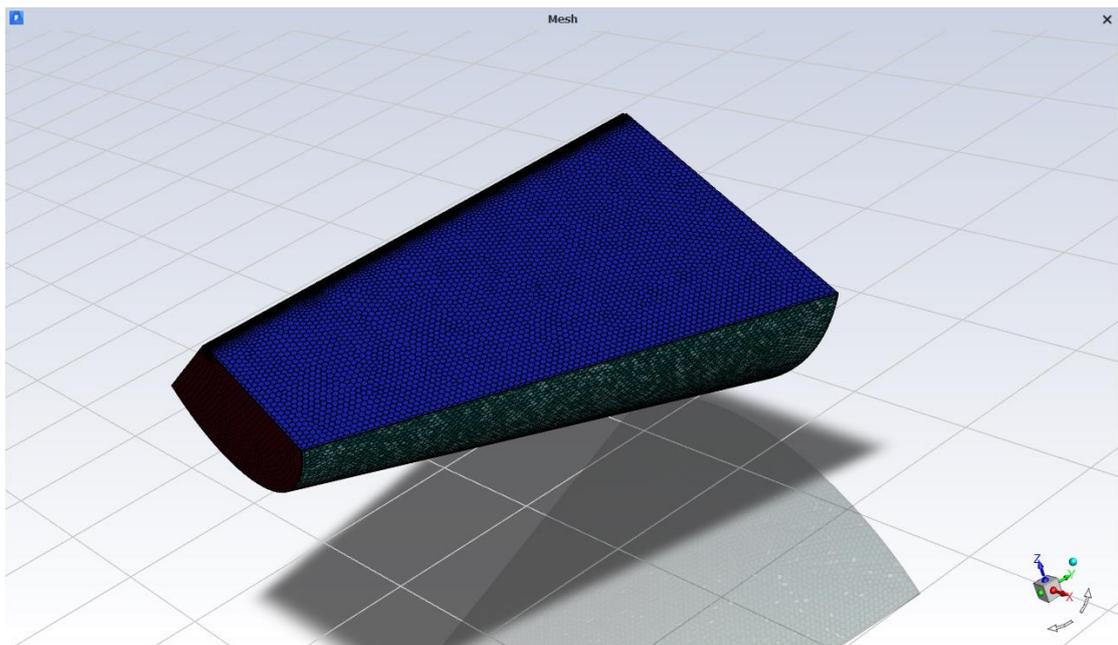
**Gambar 3. 11** Pemodelan Domain *Stream Tube*

## 2. Meshing

Proses *meshing* pada domain *streamtube* yang telah dibuat, akan dilakukan dengan menggunakan Ansys Fluent With Meshing. Dimana pada *meshing* akan dilakukan secara berurutan. Pertama-tama akan dimulai dari *surface mesh* pada permukaan-permukaan dari domain, lalu diproses menjadi *grid* melalui *volume mesh*. *Surface* yang pertama dilakukan pada permukaan bilah dengan menggunakan *curvature* sebesar  $8^\circ$ . Penggunaan *curvature*  $8^\circ$  ini dilakukan agar *mesh* dapat menangkap kelengkungan dari profil *airofil* bilah, sehingga dalam proses komputasi tidak mempengaruhi akurasi komputasi secara signifikan. Disamping itu, dalam tahap ini juga terdapat pendefinisian ukuran *mesh* minimum dan maksimum. Pendefinisian ukuran *mesh* minimum dan maksimum yang dilakukan akan dijelaskan lebih lanjut dalam tahap uji konvergensi *grid independence test*. Selanjutnya, proses *surface mesh* dilakukan pada permukaan domain fluida dengan menggunakan *curvature* sebesar  $12^\circ$ . Penggunaan *curvature* pada domain fluida lebih besar dibandingkan dengan *curvature* pada bilah turbin angin, hal ini dikarenakan domain fluida memiliki geometri yang tidak melengkung jika dibandingkan dengan bilah turbin angin. *Mesh element* yang digunakan merupakan bentuk *polygonal* sehingga baik dalam menangkap bentuk geometri permukaan yang memiliki kelengkungan yang tinggi dan memiliki akurasi serta waktu komputasi yang relatif lebih bagus jika dibandingkan dengan *mesh element* yang lain.



**Gambar 3. 12** Mesh pada permukaan Bilah Turbin Angin



**Gambar 3. 13** Mesh pada permukaan Domain Fluida

Dalam proses *meshing*, *inflation layer* juga diterapkan pada permukaan bilah agar dapat menangkap efek *boundary layer* dengan baik. Jumlah *inflation layer* yang digunakan adalah 5 dan *growth rate* sebesar 1,2. Model turbulensi yang digunakan pada penelitian ini adalah SST K- $\omega$  sehingga tinggi lapisan pertama harus memiliki nilai non dimensional, yaitu  $y^+ < 5$  untuk daerah *laminar sub-layer* atau memiliki nilai non-dimensional, yaitu  $30 < y^+ < 300$  untuk daerah *log-law*. Dalam penelitian ini daerah *log-law* dipilih sebagai *wall function* dan penulis memilih target nilai  $y^+$  yang diinginkan adalah sebesar 50 dikarenakan untuk menghindari daerah *buffer* yang dimana merupakan daerah dengan error yang tinggi serta untuk meringankan beban komputasi. Apabila target nilai  $y^+$  pada seluruh permukaan bilah adalah konstan, maka *first layer height* terkecil akan didapatkan pada daerah dengan bilangan *Reynold* terbesar. Dengan

demikian, perlu dilakukannya perhitungan bilangan *Reynold* pada seluruh elemen bilah turbin. Contoh perhitungan dengan menggunakan elemen nol adalah sebagai berikut.

Perhitungan *headwind* yaitu angin akibat pergerakan bilah yang berputar pada 1000 rpm atau 104,72 rad/s:

$$U_{headwind} = \omega r \dots\dots\dots(3.10)$$

$$U_{headwind} = (104,72)(0,18)$$

$$U_{headwind} = 18,85 \text{ m/s}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan *relative wind* yaitu resultan dari *real wind* yaitu kecepatan angin *freestream* (*real wind*) dan *headwind* sebagai berikut:

$$U_{relative \text{ wind}} = \sqrt{U_{real \text{ wind}}^2 + U_{headwind}^2} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$U_{relative \text{ wind}} = \sqrt{17^2 + 18,85^2}$$

$$U_{relative \text{ wind}} = 25,3832 \text{ m/s}$$

Setelah itu dilakukan perhitungan *Reynold Number* dimana elemen nol bilah turbin angin memiliki panjang *chord* sebesar 0,12 m, massa jenis dan viskositas dinamis dari angin adalah 1.164 kg/m<sup>3</sup> dan 1.7894 × 10<sup>-5</sup> kg/m.s:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$Re = \frac{(1,164)(25,3832)(0,12)}{0,000017894}$$

$$Re = 203766$$

Perhitungan *reynold number* pada seluruh elemen bilah turbin angin akan dicantumkan sebagaimana pada tabel dibawah ini.

**Tabel 3. 6** Perhitungan *Reynold Number* pada Seluruh Elemen Bilah Turbin Angin

Elemen	R (m)	Real Wind (m/s)	Headwind (m/s)	Relative wind (m/s)	Chord (m)	Reynold Number
0	0,18	17	18,85	25,3832	0,120	203766
1	0,282		29,53	34,0747	0,111	253022
2	0,344		36,02	39,8335	0,102	271802
3	0,426		44,61	47,7401	0,093	297009
4	0,508		53,20	55,8480	0,084	313827
5	0,59		61,78	64,0809	0,075	321509
6	0,672		70,37	72,3961	0,066	319641
7	0,754		78,96	80,7682	0,057	307978
8	0,836		87,55	89,1812	0,048	286364
9	0,918		96,13	97,6245	0,039	254699
10	1		104,72	106,0909	0,030	212913

Berdasarkan tabel diatas, didapatkan bahwa *reynold number* terbesar adalah 321509. Maka dari itu, nilai *reynold number* yang akan digunakan dalam perhitungan untuk mencari  $y^+$  adalah sebesar 321509. Langkah selanjutnya adalah memperkirakan gesekan pada dinding dengan menggunakan *skin friction correlation Schlichting*:

$$C_f = [2 \log_{10}(Re) - 0,65]^{-2.3} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$C_f = [2 \log_{10}(321509) - 0,65]^{-2.3}$$

$$C_f = 0,002702338619$$

Selanjutnya tegangan geser pada dinding dapat dihitung sebagai berikut:

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho U^2 \dots\dots\dots(3.14)$$

$$\tau_w = (0,002702338619) \frac{1}{2} (1,164)(64,0809)^2$$

$$\tau_w = 6,458325917 \text{ Pa}$$

Kemudian, dilakukan perhitungan kecepatan gesekan dengan referensi tegangan geser dinding yang telah didapat:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \dots\dots\dots(3.15)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{6,458325917}{1,164}}$$

$$u_\tau = 2,355502062 \text{ m/s}$$

Lalu, langkah terakhir yang dilakukan adalah menghitung *first layer height* untuk *inflation layer* dengan menggunakan persamaan  $y^+$ :

$$y^+ = \frac{\rho y^* u_\tau}{\mu} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$y^* = \frac{(y^+ \mu)}{\rho u_\tau} \dots\dots\dots(3.17)$$

$$y^* = \frac{(50)(0.000017894)}{(1,164)(2,355502062)}$$

$$y^* = 0.0003263 \text{ m}$$

Langkah selanjutnya dalam proses *meshing* adalah tahap penentuan *volume mesh*. *Mesh element* yang akan digunakan adalah *poly-hexcore*. *Poly-hexcore* merupakan gabungan antara *polyhedral* dan *hexahedral*, yang dimana *element mesh* ini akan menghasilkan bentuk *polyhedral* dengan ini berupa *hexahedral*. *Poly-hexcore* merupakan *mesh element* yang mampu menghasilkan jumlah elemen yang lebih sedikit dengan kualitas yang baik. Ukuran minimum *volume mesh* yang akan digunakan adalah 0,0005 m dan ukuran maksimum *volume mesh* yang akan digunakan adalah 0,256 m.

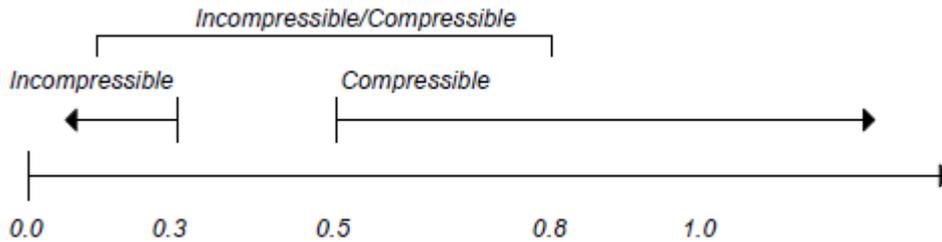
### 3. Model Turbulensi

Dalam simulasi CFD Ansys Fluent, model turbulensi yang digunakan adalah model SST K- $\omega$ . Model turbulensi ini memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menangkap aliran separasi dan *adverse pressure gradient*. Disisi lain, model turbulensi ini memiliki performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan model turbulensi *realizable* K- $\epsilon$ . Model turbulensi SST K- $\omega$  juga memiliki kemampuan dalam menangkap aliran separasi dalam kecepatan yang tinggi. Model turbulensi ini pada umumnya sering digunakan pada studi mengenai performa *airfoil* baik yang digunakan pada turbin angin maupun sayap pesawat. (Halim, Mohd, Nasir, & Dahalan, 2018)

### 4. Solution Method

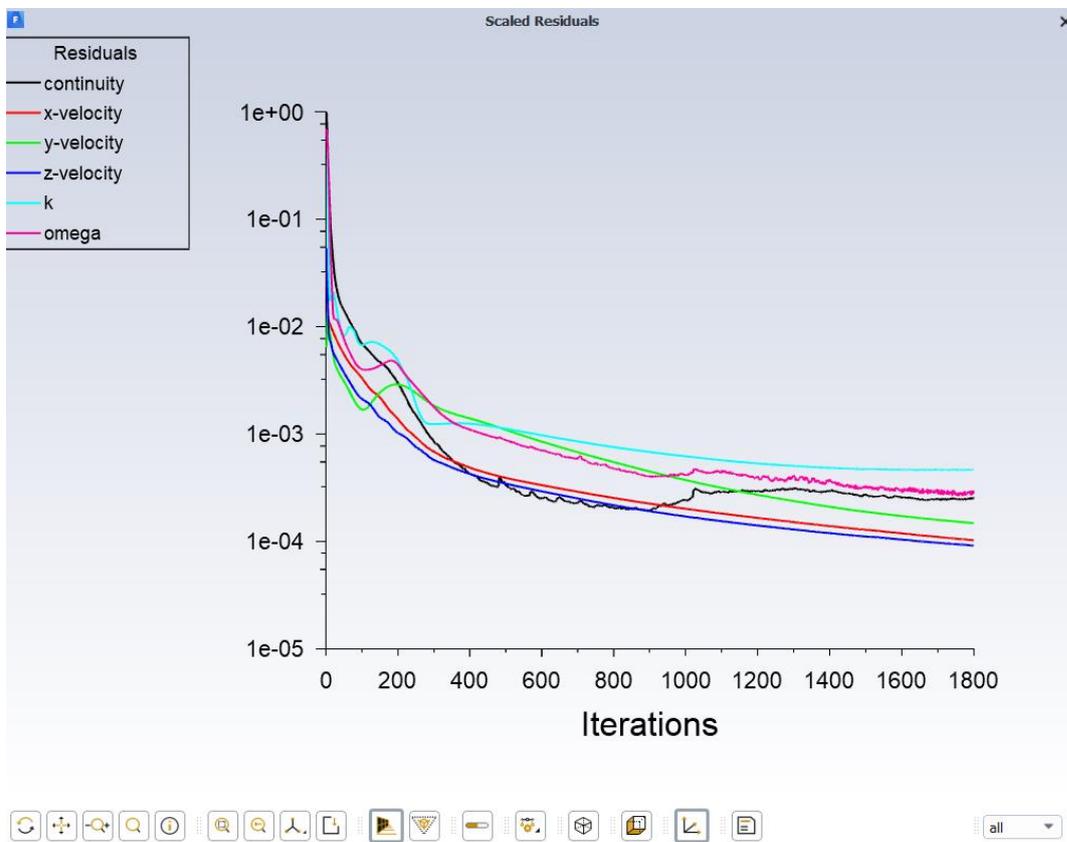
Dalam Ansys CFD Fluent, umumnya tipe *solver* yang sering digunakan adalah *pressured-based* dan *density-based*. Berdasarkan pendekatan kedua *solver* diatas, *pressured-based* merupakan *solver* yang sering diterapkan dalam kasus *low-speed incompressible flows*.

Sementara itu, *density-based* merupakan *solver* yang sering diterapkan dalam kasus *high-speed compressible flows*. Dalam penelitian ini, tipe *solver* yang akan digunakan adalah *pressure-based*. Hal ini dikarenakan kecepatan yang digunakan dalam simulasi *fluent* ini jauh berada dibawah dari kecepatan 0,3 mach. Oleh karena itu, fluida dapat dianggap sebagai *low-speed incompressible flows*. Penjelasan mengenai karakter dari *incompressible* dan *compressible flows* dapat dilihat pada gambar dibawah ini. (Denk, 2007)



**Gambar 3. 14** Karakter *incompressible* dan *compressible flows*

Densitas udara yang digunakan adalah  $1,164 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas dinamis udara yang digunakan adalah  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}^{-1}$ . *Velocity inlet* yang mengenai permukaan luar domain di atur dengan kecepatan angin 17 m/s. Bilah turbin dianggap sebagai dinding diam *non-slip*, dan *rotating frame* diterapkan pada semua domain untuk memperhitungkan kecepatan putar dari rotor dengan kecepatan 1000 rpm atau 104,72 rad/s. Kriteria konvergen diatur pada nilai  $10^{-4}$  dikarenakan nilai residual ini sering digunakan pada simulasi CFD pada *airfoil*. Inisialisasi dilakukan dengan metode *hybrid* agar memudahkan dalam komputasi dan *solving* akan terus dilakukan hingga grafik residual dapat mencapai nilai konvergensi yang telah diatur.



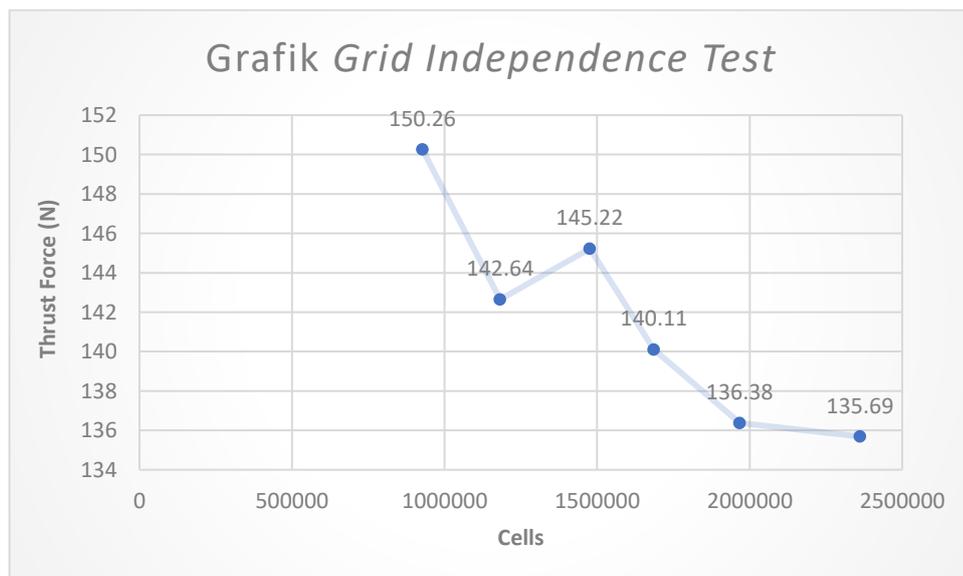
**Gambar 3. 15** Grafik *Scaled Residuals* dengan Jumlah Iterasi 1800

## 5. Uji Konvergensi Grid Independence Test

Dalam proses *solving*, hasil yang didapatkan tentunya tidak langsung berupa hasil yang akurat. Hal ini dikarenakan proses *meshing* tidak bisa sepenuhnya diperhitungkan secara analitis, seperti ukuran mesh, jenis mesh, dan lain sebagainya. Tentunya ini dapat terjadi dikarenakan sifat dari geometri bilah turbin memiliki bentuk yang kompleks. Oleh karena itu, dibutuhkannya suatu metode untuk membuktikan bahwa hasil simulasi telah mendekati keakuratan terhadap pengaruh resolusi *mesh*. Metode yang akan digunakan untuk menjawab objektif diatas adalah dengan menggunakan metode *Grid Independence Test*. Proses ini dilakukan secara *iterative* dengan memperkecil ukuran *mesh* hingga hasil simulasi mendekati keakuratan terhadap perubahan ukuran *mesh*. Beberapa variabel bebas yang digunakan pada pengujian ini adalah ukuran minimum dan maksimum dari *local surface mesh* pada bilah turbin angin dan *global surface mesh* pada domain fluida. Kemudian, variabel tetap pada pengujian ini adalah *curvature local mesh* dan *global surface mesh*, *first layer height*, *inflation layer*, *buffer layer*, *peel layer*, dan ukuran minimum dan maksimum *volume mesh*. Perhitungan error dilakukan dengan mengacu kepada hasil nilai *thrust force* yang merupakan gaya resultan dari gaya *thrust* pada sumbu x (gaya *drag*) dan gaya *thrust* pada sumbu y (gaya *lift*) yang bekerja pada bilah turbin angin.

**Tabel 3. 7** Iterasi yang Dilakukan dalam Uji Konvergensi

Local Surface Mesh (m)		Global Surface Mesh (m)		Volume Mesh (m)		Number Of Cell	Thrust Force (N)	Error (%)
Min Size	Max Size	Min Size	Max Size	Min Size	Max Size			
0,001	0,06	0,1	0,2	0,0005	0,256	927526	150,26	-
0,0009	0,05	0,09	0,19	0,0005	0,256	1182663	142,64	5,07%
0,0008	0,04	0,08	0,18	0,0005	0,256	1475821	145,22	1,81%
0,0007	0,03	0,07	0,17	0,0005	0,256	1686173	140,11	3,52%
0,0006	0,02	0,06	0,16	0,0005	0,256	1967255	136,38	2,66%
0,0005	0,01	0,05	0,15	0,0005	0,256	2361597	135,69	0,51%

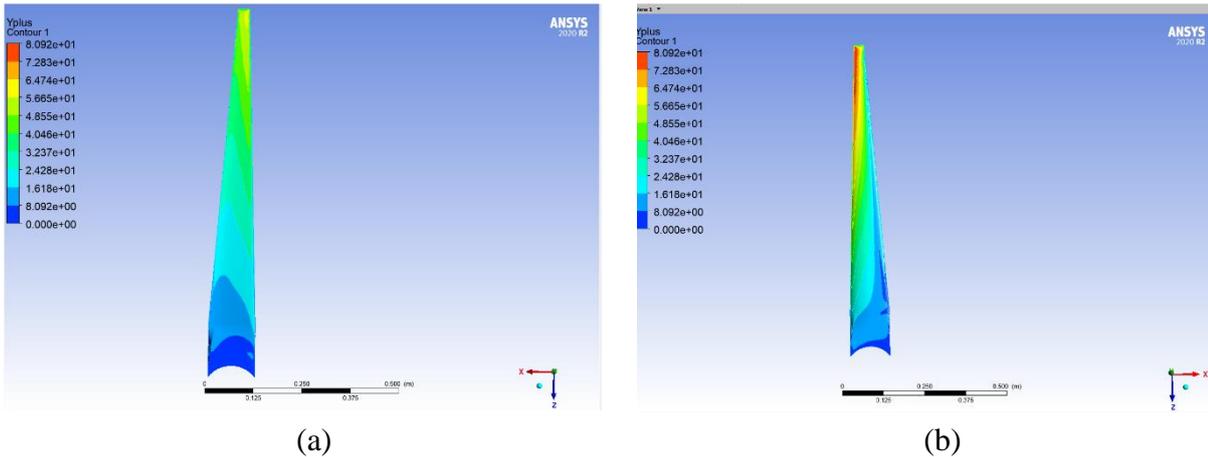


**Gambar 3. 16** Grafik *Grid Independence Test*

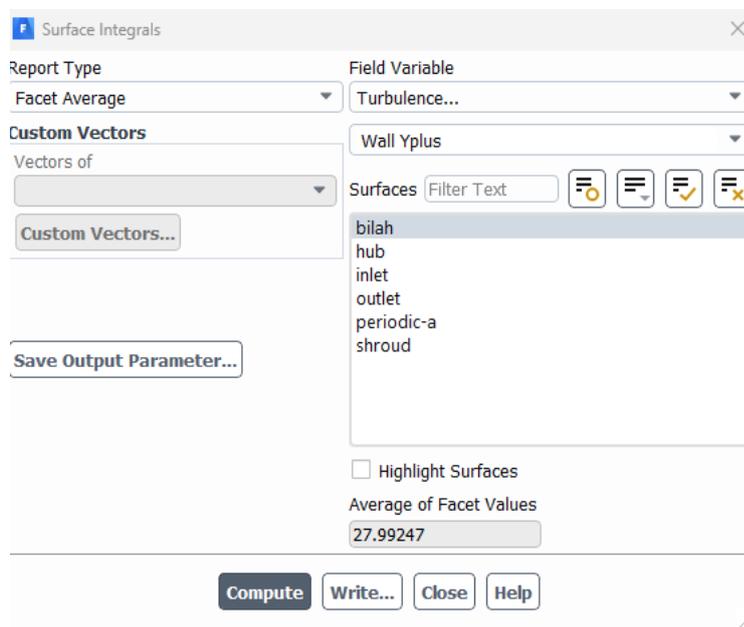
Berdasarkan tabel diatas, didapatkan bahwa simulasi telah konvergen pada iterasi ke-6. Hal itu dibuktikan dengan nilai relative error yang sudah kecil. Maka dari itu, simulasi yang akan digunakan pada Ansys *Fluent* ini adalah pada iterasi ke-6.

## 6. Post-Processing

Pada tahap ini dilakukan dengan mengevaluasi distribusi nilai  $y^+$  dan *pressure distribution* yang dihasilkan oleh kecepatan angin pada permukaan bilah turbin. Proses evaluasi nilai  $y^+$  bertujuan untuk memvalidasi apakah nilai  $y^+$  sudah sesuai dengan yang diharapkan. Nilai dari  $y^+$  pada bilah turbin ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



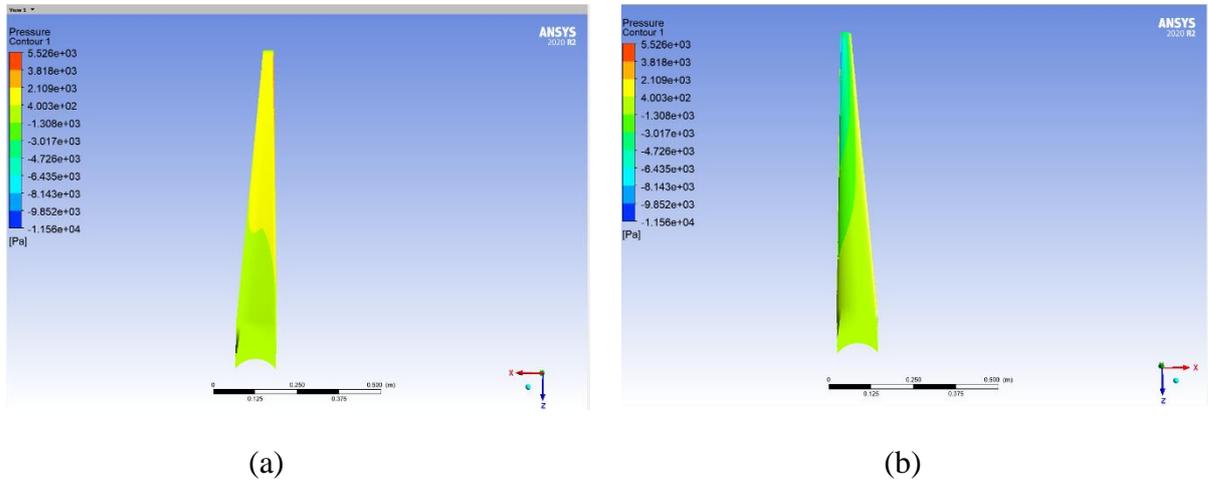
**Gambar 3. 17** Distribusi Nilai  $Y^+$  pada Bilah Turbin Bagian (a) Sisi *Pressure* (b) Sisi *Suction*



**Gambar 3. 18** Nilai Rata-Rata Wall  $Y^+$

Berdasarkan hasil gambar diatas, didapatkan bahwa rata-rata nilai  $y^+$  adalah 27,99 yang dimana nilai ini berada tidak jauh dari daerah *log-law*. Hasil nilai rata-rata  $y^+$  dari simulasi cukup jauh dari nilai  $y^+$  yang telah ditentukan diawal, yaitu 50. Hal ini bisa disebabkan karena permukaan bilah yang tingkat kelengkungannya yang tinggi. Namun secara *general*, hasil dari simulasi masih dapat diterima karena sebagian besar nilai  $y^+$  masih berada pada daerah *log-law*.

Selanjutnya pada tahap *post-processing* ini dilihat bagaimana hasil *pressure distribution* pada bilah bagian sisi depan (*pressure*) dan bagian sisi belakang (*suction*). *Pressure distribution* yang dihasilkan terlihat sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar.



**Gambar 3. 19** Gambar Distribusi Tekanan pada Bilah Turbin Bagian (a) *Pressure* (b) *Suction*

Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa tekanan terbesar berada di *leading edge* pada sisi *pressure* dekat *tip* bilah sebesar 5,53 kPa, dan tekanan terkecil berada di *leading edge* pada sisi *suction* dekat *tip* bilah sebesar -11,56 kPa. Kontur berbentuk *airfoil* menyebabkan aliran angin pada sisi *pressure* lebih rendah dan sisi *suction* lebih tinggi, sehingga terjadi tekanan yang lebih tinggi pada sisi *pressure* dan tekanan yang lebih rendah pada sisi *suction*. Hal ini yang menyebabkan terjadinya gaya *lift* pada bilah. *Twist angle* dari bilah berfungsi untuk menyesuaikan angin relatif lokal yang terjadi pada bilah akibat *real wind* dan *headwind*. Maka dari itu, tekanan maksimum bergeser ke arah *leading edge* dan titik stagnasi bergeser ke permukaan sisi *suction*, menyebabkan tekanan negatif yang semakin rendah pada bagian belakang bilah. Selain itu, karena turbin angin mengalami *headwind* yang disebabkan oleh gerakan berputar dari bilah, maka terdapat tekanan dinamis tambahan dari *headwind* yang menyebabkan terjadinya gaya *drag*, sehingga tekanan maksimum semakin bergeser ke arah *leading edge*. Hal ini dibuktikan dengan tekanan yang lebih tinggi semakin ke ujung bilah dimana kecepatan *headwind* semakin besar seiring pertambahan jari-jari.

### 3.8.2 Simulasi Static Structural

Dalam proses ini dilakukan uji simulasi kekuatan struktur bilah turbin dengan rancangan struktur material dengan komposit sisal-*epoxy*. Proses pembuatan mikrostruktur komposit dengan menggunakan material designer sedangkan proses pembuatan makrostruktur dilakukan dengan menggunakan Ansys ACP Prepost.

Serat komposit yang digunakan adalah serat sisal dengan matriks *epoxy*. Hal ini dikarenakan serat sisal banyak dibudidayakan di Indonesia dan serat ini merupakan salah satu serat yang berasal dari alam. Oleh sebab itu, serat ini memiliki kelebihan *biodegradable* dan memiliki ketersediaan yang melimpah di alam serta memiliki harga yang sangat terjangkau, yakni 0,36 US\$/kg atau sekitar 6000 Rupiah/Kg (Kusumastuti, 2009).

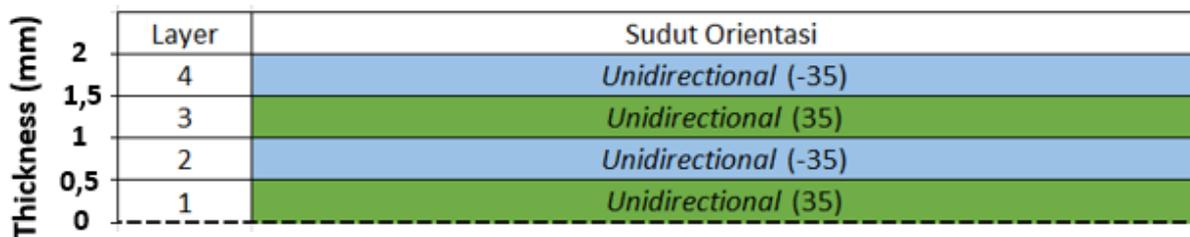
Jenis komposit yang digunakan dalam laminasi adalah *unidirectional* dikarenakan berdasarkan salah satu literatur menyatakan bahwa serat sisal-*epoxy* dapat dimanufaktur dalam bentuk *unidirectional* dan turbin Proses manufaktur komposit *unirectional* sisal-*epoxy* dilakukan dengan *vacuum bagging* dengan metode *hand lay-up* atau *spray lay-up* (Fajrin, 2016). Adapun komposit ini akan dilakukan penumpukan dengan variasi orientasi komposit sebesar  $\pm 35^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,

$\pm 55^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$ . Kemudian berdasarkan variasi tersebut, akan dibandingkan pengaruh sudut orientasi komposit terhadap kekuatan struktur material bilah turbin. Ketebalan maksimal lapisan komposit yang diinginkan adalah 2 mm terhadap bagian sisi *pressure* dan sisi *suction* bilah turbin angin. Hal ini menjadi batasan penelitian yang ditetapkan oleh penulis karena mempertimbangkan aerodinamis bilah turbin angin itu sendiri.

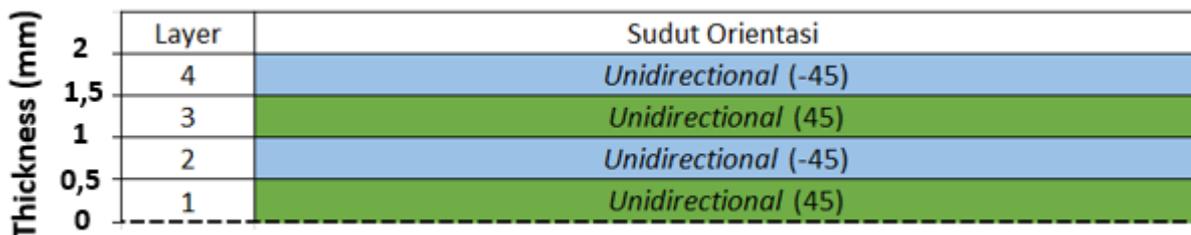
**Tabel 3. 8** Variasi Orientasi Sudut Komposit

Variasi Orientasi Sudut Komposit			
Material	Arah Sudut Serat	Ketebalan	Jenis
Serat Sisal- Epoxy	$[\pm 35^\circ]_2$	2 mm	<i>Unidirectional composite</i>
	$[\pm 35^\circ]_{2s}$		
	$[\pm 45^\circ]_2$		
	$[\pm 45^\circ]_{2s}$		
	$[\pm 55^\circ]_2$		
	$[\pm 55^\circ]_{2s}$		
	$[0^\circ/90^\circ]_2$		
	$[0^\circ/90^\circ]_{2s}$		

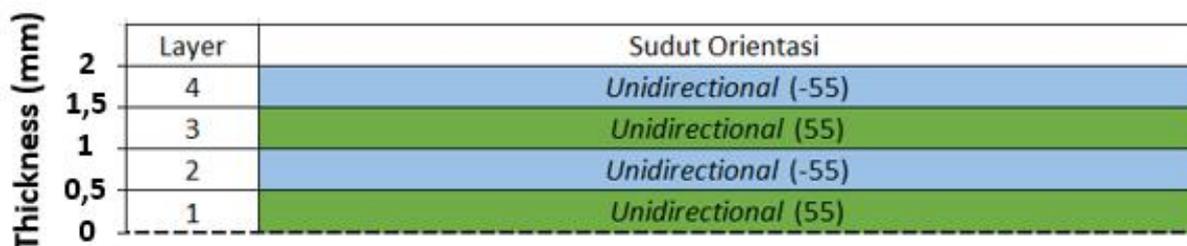
Adapun untuk gambar penjabar *stacking sequence* dari tumpukan masing-masing variasi orientasi sudut komposit adalah sebagai berikut.



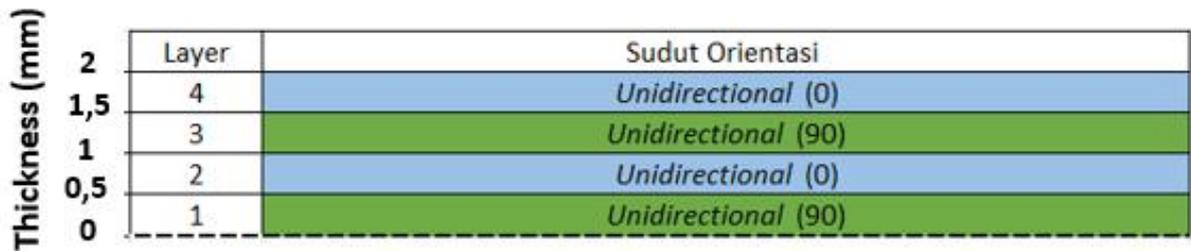
(a)



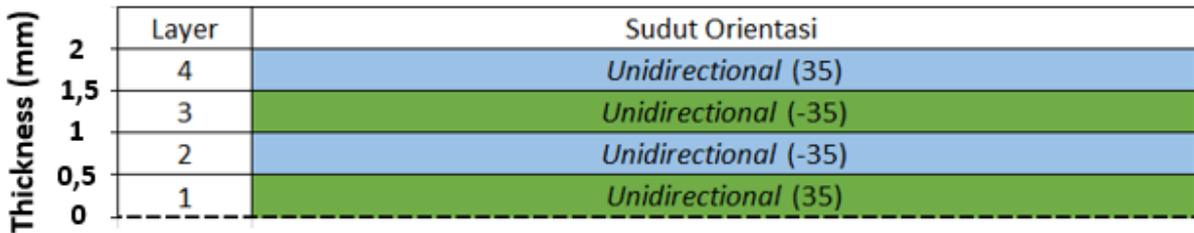
(b)



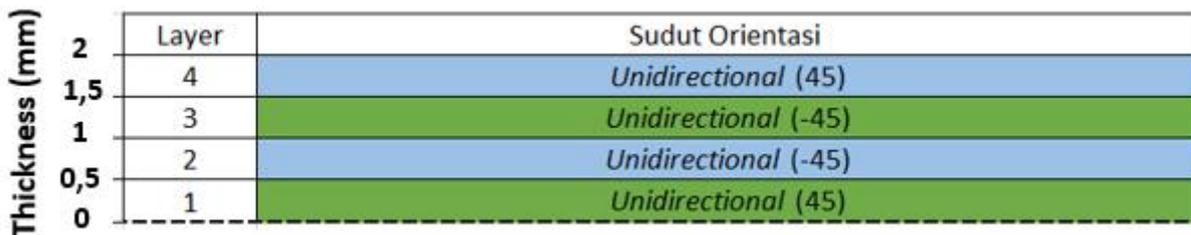
(c)



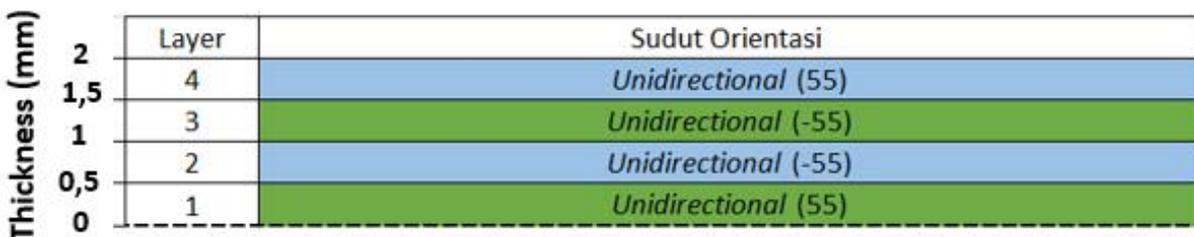
(d)



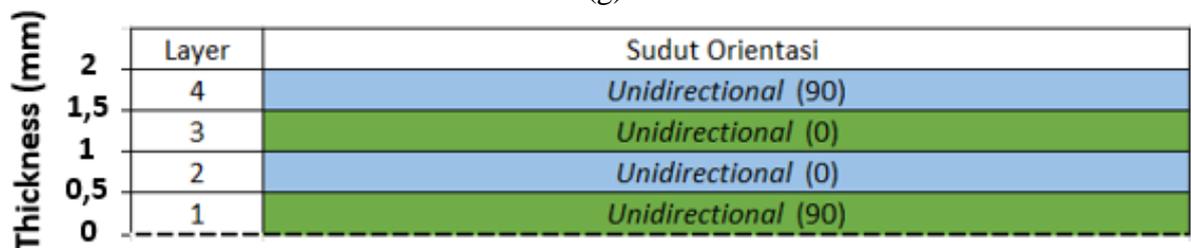
(e)



(f)



(g)



(h)

**Gambar 3. 20** Stacking sequence untuk masing-masing variasi orientasi sudut komposit  
 (a)  $[\pm 35^\circ]_2$  (b)  $[\pm 45^\circ]_2$  (c)  $[\pm 55^\circ]_2$  (d)  $[90^\circ/0^\circ]_2$  (e)  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  (f)  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  (g)  $[\pm 55^\circ]_{2s}$   
 (h)  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$

## 1. Penyusunan *Material Komposit*

Sifat mekanik dari komposit sangat bergantung dari komponen komponen pembentuknya, karena sifat dari komposit sendiri adalah ortotropik. Oleh karena itu diperlukan adanya permodelan komposit secara mikrostruktur terlebih dahulu untuk mendapatkan elastisitas ortotropik dari komposit yang akan dirancang. Permodelan dilakukan dengan menggunakan *ANSYS Material Designer*. Dalam *material designer* kita akan memasukkan *Material Properties* dari penguat maupun matriks kedalam tabel *engineering data*.

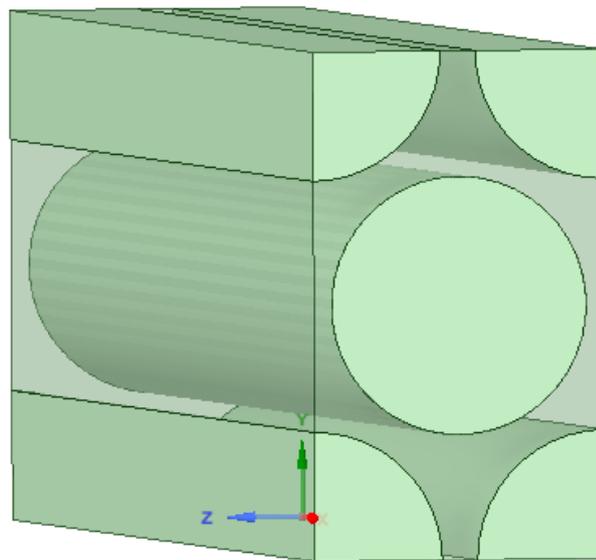
Properties of Outline Row 4: Serat Sisal				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1450	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young'...		
6	Young's Modulus	9.4E+09	Pa	
7	Poisson's Ratio	0.32		
8	Bulk Modulus	8.7037E+09	Pa	
9	Shear Modulus	3.5606E+09	Pa	
10	Tensile Ultimate Strength	530	MPa	
11	Compressive Ultimate Strength	33.6	MPa	
12	Tsai-Wu Constants			
13	Coupling Coefficient XY	-1		
14	Coupling Coefficient YZ	-1		
15	Coupling Coefficient XZ	-1		

**Gambar 3. 21** Penginputan *Material Properties* Serat Sisal

Properties of Outline Row 3: Resin Epoxy				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1160	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young'...		
5	Young's Modulus	3.78E+09	Pa	
6	Poisson's Ratio	0.35		
7	Bulk Modulus	4.2E+09	Pa	
8	Shear Modulus	1.4E+09	Pa	
9	Tensile Ultimate Strength	97	MPa	
10	Ply Type			

**Gambar 3. 22** Penginputan *Material Properties* Resin Epoxy

Pada penelitian ini, komposit yang digunakan adalah serat sisal dengan matriks resin epoxy. Model RVE yang digunakan adalah *unidirectional* dengan geometri *hexagonal*. Lalu pada perancangan geometri mikrostruktur komposit, fraksi volume fiber yang digunakan adalah 0,7 dan fraksi volume matriks adalah 0,3. Ukuran dari fiber diameter yang digunakan adalah 150  $\mu\text{m}$ . Proses *meshing* dilakukan secara *default* dengan menggunakan *periodic meshing* agar mendapatkan *mesh* yang memiliki *boundary* simetris secara translasi. Tujuan dari pemodelan ini adalah untuk mendapatkan nilai dari properti elastisitas ortotropik dari komposit serat sisal dan matriks epoksi yang telah di homogenisasi.



**Gambar 3. 23** Model Mikrostruktur *unidirectional* Serat Sisal-Epoxy

Setelah itu dilakukan proses *meshing* secara *default* dengan menggunakan *periodic meshing* agar mendapatkan *mesh* yang memiliki *boundary* simetris secara translasi. Setelah proses *meshing* dilakukan proses analisis dan didapat properti elastisitas ortotropik dari komposit yang telah di homogenisasi. Konstanta *Tsai-Wu* yang digunakan pada penelitian ini disederhanakan menjadi -1 pada seluruh bidang agar menyerupai kriteria kegagalan *Von mises*. Lalu dengan dilengkapi kekuatan ortotropik material komposit yang diperoleh melalui pengumpulan data, maka didapat properti material komposit *unidirectional* Sisal-Epoxy sebagai berikut.

Name	Value	Unit	P
<b>Engineering Constants</b>			
E1	7714,7	MPa	<input type="checkbox"/>
E2	6994,6	MPa	<input type="checkbox"/>
E3	6994,6	MPa	<input type="checkbox"/>
G12	2631	MPa	<input type="checkbox"/>
G23	2603,6	MPa	<input type="checkbox"/>
G31	2631	MPa	<input type="checkbox"/>
nu12	0,32819		<input type="checkbox"/>
nu13	0,32818		<input type="checkbox"/>
nu23	0,34312		<input type="checkbox"/>
<b>Density</b>			
rho	1,363E-09	t mm <sup>-3</sup>	<input type="checkbox"/>
<b>Logs</b>			
RVE log			
Solver logs			

**Gambar 3. 24** Nilai *Material Properties unidirectional* sisal-epoxy dari Material Designer  
 Dalam mendapatkan nilai dari *Orthotropic Stress Limit* dari komposit sisal-epoxy digunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\varepsilon_m &= \frac{\sigma_m}{E_m} & \varepsilon_f &= \frac{\sigma_f}{E_f} \\ \varepsilon_m &= \frac{97}{3780} & \varepsilon_f &= \frac{530}{9400} \\ \varepsilon_m &= 0,02566 & \varepsilon_f &= 0,05638\end{aligned}$$

Dikarenakan nilai dari  $\varepsilon_m < \varepsilon_f$ , maka perhitungan nilai *longitudinal tensile strength* dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}(\sigma_{x_c}^T)_{ult} &= (\varepsilon_{1_m}^T) E_{1_f} V_f + (\sigma_m^T)_{ult} (1 - V_f) \\ (\sigma_{x_c}^T)_{ult} &= (0,02566 \cdot 9400 \cdot 0,7) + (97 \cdot (1 - 0,7)) \\ (\sigma_{x_c}^T)_{ult} &= 197,95 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Selanjutnya perhitungan untuk *transverse tensile strength* pada komposit adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}(\sigma_{y_c}^T)_{ult} &= E_{2c} \left[ 1 + \left( \frac{E_m}{E_{2f}} - 1 \right) V_f \right] (\varepsilon_m^T)_{ult} \\ (\sigma_{y_c}^T)_{ult} &= 6994,6 \left[ 1 + \left( \frac{3780}{9400} - 1 \right) 0,7 \right] 0,02566 \\ (\sigma_{y_c}^T)_{ult} &= 104,37 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Perhitungan untuk *longitudinal compressive strength* dan *transverse compressive strength* adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}(\sigma_{x_c}^C)_{ult} &= 2(\tau_f)_{ult} \left[ V_f + \frac{E_m}{E_{2f}} - (1 - V_f) \right] \\ (\sigma_{x_c}^C)_{ult} &= 2 \cdot (19,1) \left[ 0,7 + \frac{3780}{9400} - (1 - 0,7) \right] \\ (\sigma_{x_c}^C)_{ult} &= 31,34 \text{ MPa} \\ (\sigma_{y_c}^C)_{ult} &= E_{2c} \left[ 1 + \left( \frac{E_m}{E_{2f}} - 1 \right) V_f \right] (\varepsilon_m^C)_{ult} \\ (\sigma_{y_c}^C)_{ult} &= 6994,6 \left[ 1 + \left( \frac{3780}{9400} - 1 \right) 0,7 \right] (0,0275) \\ (\sigma_{y_c}^C)_{ult} &= 111,9 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Kemudian untuk perhitungan *longitudinal shear strength (In-Plane Shear)* dan *transverse shear strength (Out-Plane Shear)* adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}(\tau_{xy_c})_{ult} &= G_{12c} \left[ 1 + \left( \frac{G_m}{G_{12f}} - 1 \right) V_f \right] (\gamma_m)_{ult} \\ (\tau_{xy_c})_{ult} &= 2631 \left[ 1 + \left( \frac{1400}{3560} - 1 \right) 0,7 \right] 0,0285\end{aligned}$$

$$(\tau_{xy_c})_{ult} = 43,24 \text{ MPa}$$

$$(\tau_{yz_c})_{ult} = \frac{(\tau_{xy_c})_{ult}}{2}$$

$$(\tau_{yz_c})_{ult} = \frac{43,24}{2}$$

$$(\tau_{yz_c})_{ult} = 21,62 \text{ MPa}$$

Setelah dilakukan perhitungan *Orthotropic Stress Limit*, maka material properties dari komposit dapat dituliskan dalam tabel sebagai berikut.

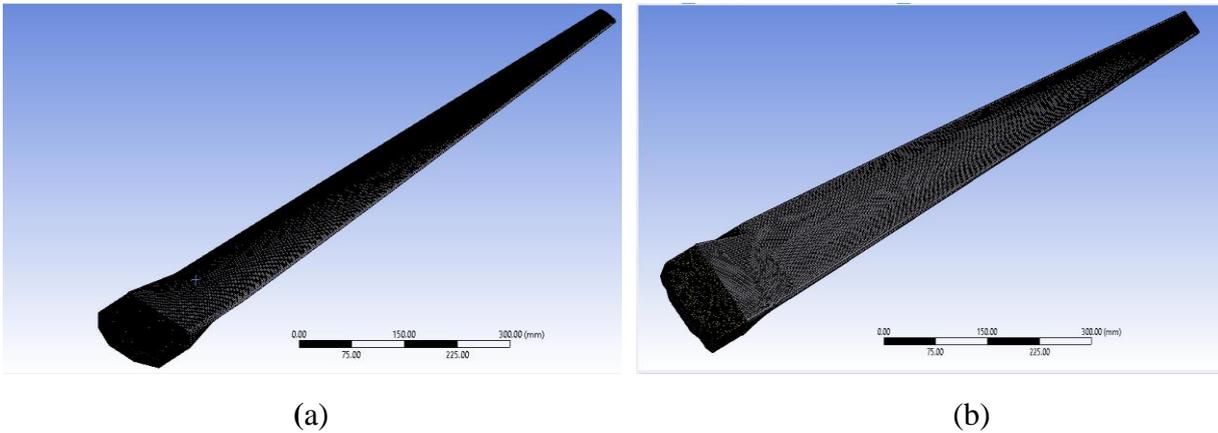
**Tabel 3. 9** *Material Properties* dari komposit *unidirectional sisal-epoxy*

Properties	Nilai	Unit
Young Modulus X Direction	7714,7	MPa
Young Modulus Y Direction	6994,6	MPa
Young Modulus Z Direction	6994,6	MPa
Shear Modulus XY	2631	MPa
Shear Modulus XZ	2631	MPa
Shear Modulus YZ	2603,6	MPa
Poisson Ratio XY Direction	0,328	MPa
Poisson Ratio XZ Direction	0,328	MPa
Poisson Ratio YZ Direction	0,343	MPa
Tensile Strength X direction	197,95	MPa
Tensile Strength Y direction	104,37	MPa
Tensile Strength Z direction	104,37	MPa
Compressive Strength X direction	-31,34	MPa
Compressive Strength Y direction	-111,90	MPa
Compressive Strength Z direction	-111,90	MPa
Shear Strength XY	43,24	MPa
Shear Strength YZ	21,62	MPa
Shear Strength XZ	43,24	MPa
Tsai-Wu Constant XY	-1	Arbitrary
Tsai-Wu Constant YZ	-1	Arbitrary
Tsai-Wu Constant XZ	-1	Arbitrary

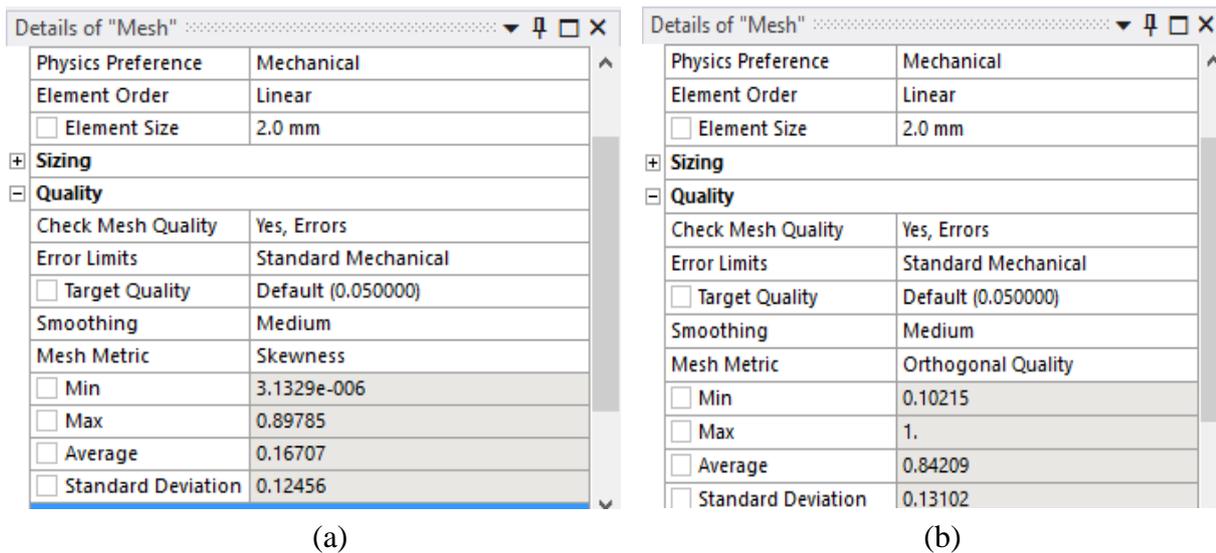
## 2. Meshing

Pada tahap ini dilakukan proses *meshing* pada model bilah turbin yang telah dilaminasi dengan komposit. Meshing dilakukan pada *surface* dari bilah turbin. Proses *meshing* dilakukan dengan tujuan untuk memotong model 3D CAD menjadi *nodes* yang merupakan inti dari metode elemen hingga. Semakin baik kualitas *meshing*, maka hasil dari simulasi akan semakin akurat atau mendekati hasil pengujian asli. Pada *meshing* ini terdapat 1 variabel bebas yang diterapkan. Metode *meshing* yang digunakan adalah *Linear*, hal ini bertujuan untuk mendapatkan hasil *mesh* yang lebih baik jika dibandingkan *program controlled*. Kemudian dilakukan *edge sizing* dengan ukuran 0,3 mm pada bagian *tip* bilah turbin angin agar hasil *mesh* mampu mendapatkan profil airfoil terkecil pada elemen ke-10. Untuk ukuran *meshing* pada

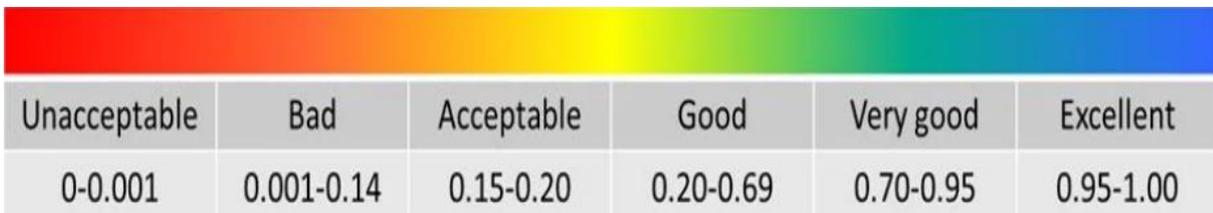
variabel bebas, selanjutnya akan dijelaskan pada tahap uji konvergensi. Terdapat dua parameter yang dapat digunakan pada Ansys *Mechanical* untuk menunjukkan bahwa hasil *meshing* sudah baik atau masih belum layak. Kedua parameter itu adalah *orthogonal quality* dan *skewness*. Berikut ini merupakan contoh hasil *meshing* dengan menggunakan ukuran elemen 2 mm.



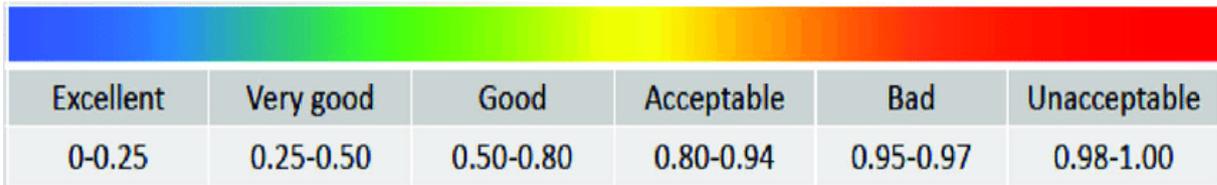
**Gambar 3. 25** Hasil *meshing surface* bilah turbin Angin bagian *suction* (a) dan *pressure* (b)



**Gambar 3. 26** Hasil *Mesh Quality* bilah turbin angin *Skewness* (a) & *Orthogonal* (b)



**Gambar 3. 27** Spektrum *Mesh Quality Orthogonal*

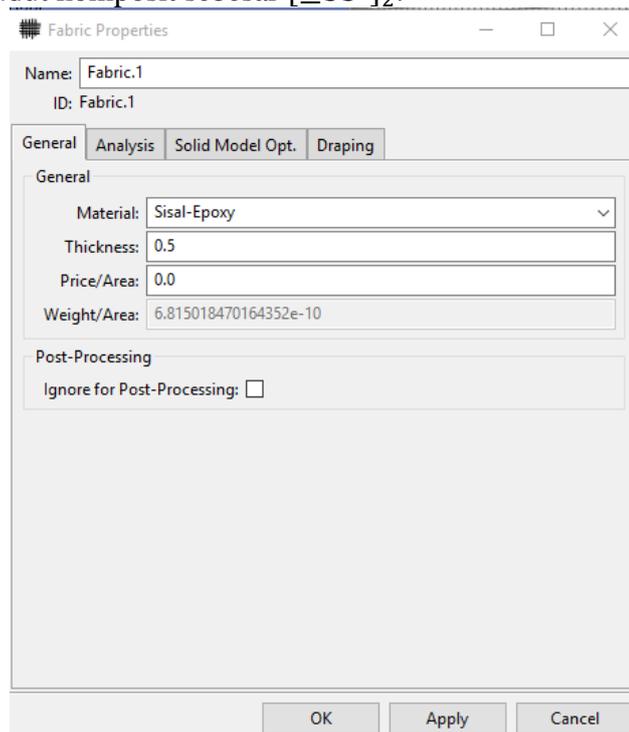


**Gambar 3. 28** Spektrum *Mesh Quality Skewness*

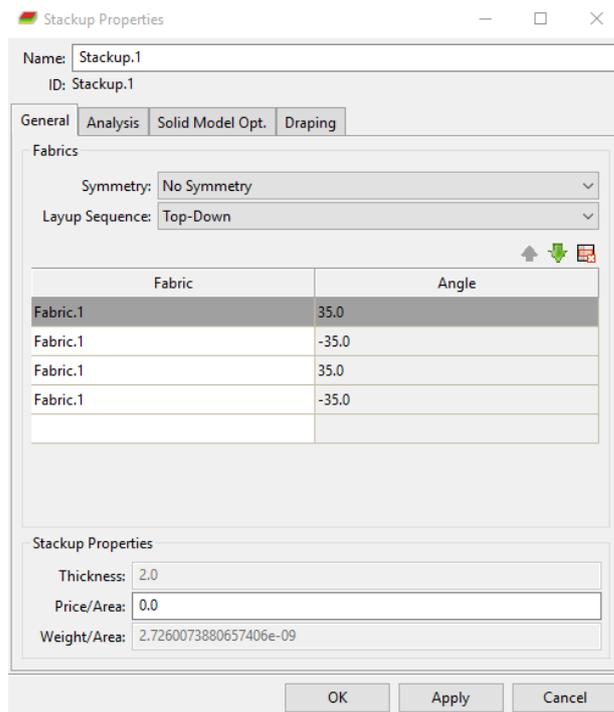
Berdasarkan gambar diatas, didapatkan kualitas *meshing* pada bilah turbin untuk *orthogonal quality* sebesar 0,84209 dan kualitas *meshing* untuk *skewness* sebesar 0,16707. Maka, hasil *meshing* masuk kedalam kategori *very good* untuk *orthogonal quality* dan *excellent* untuk *skewness* berdasarkan spektrum *mesh quality*.

### 3. Pemodelan Laminasi Komposit

Tahap pertama ialah pendefinisian material komposit yang akan digunakan serta pengaturan ketebalan lamina dari komposit. Material yang akan digunakan adalah komposit *unidirectional* sisal-epoxy yang sudah dibuat pada *material designer*. *Material properties* dari komposit ini langsung akan terhubung pada ACP Pre. Untuk variabel penulis tetapkan ketebalan lamina sebesar 0,5 mm serta jumlah *stack up* komposit terdiri dari 2 sudut orientasi sebagaimana yang telah dijelaskan pada tabel (3.10). Pada langkah-langkah di bawah ini digunakan orientasi sudut komposit sebesar  $[\pm 35^\circ]_2$ .

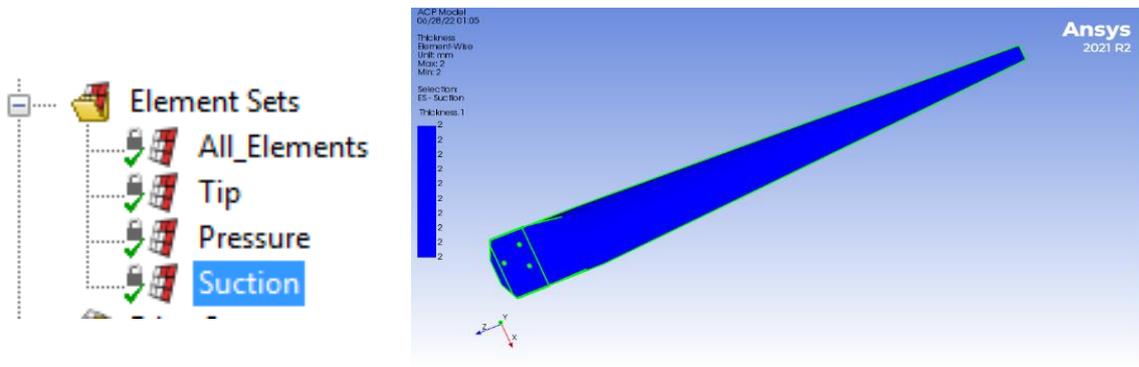


**Gambar 3. 29** Penginputan Nilai Ketebalan Lamina pada *Fabric Properties*

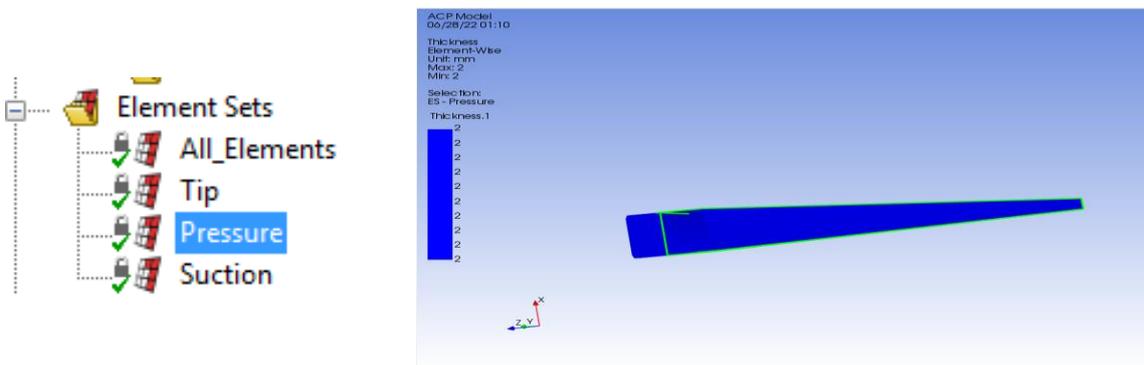


**Gambar 3. 30** Pengaturan Jumlah *Stackup* dan Orientasi Sudut Serat

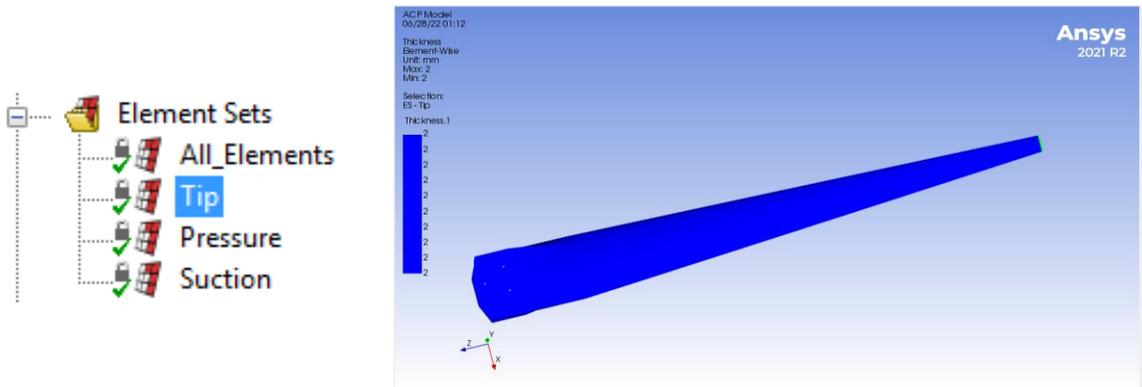
Tahap selanjutnya adalah pendefinisian *elemen sets*, dimana elemen dalam model akan dibagi kedalam 3 bagian agar dapat mempermudah proses penyusunan komposit. Hal ini dilakukan karena pada penelitian ini diinginkan pertumbuhan dari komposit berbeda arah pada bagian depan (*pressure*) bilah turbin, bagian belakang bilah turbin (*suction*), dan bagian *tip* bilah turbin.



**Gambar 3. 31** *Element Sets* Pada Bagian *Pressure* Bilah

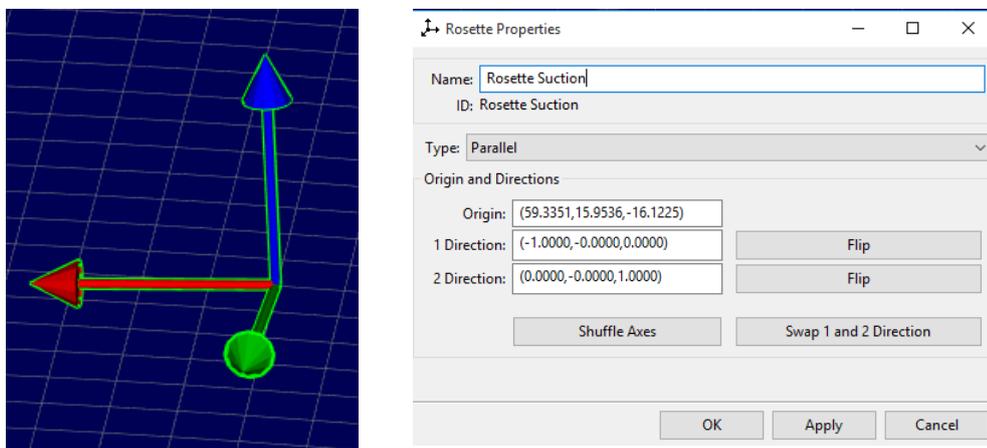


**Gambar 3. 32** *Element Sets* Pada Bagian *Suction* Bilah

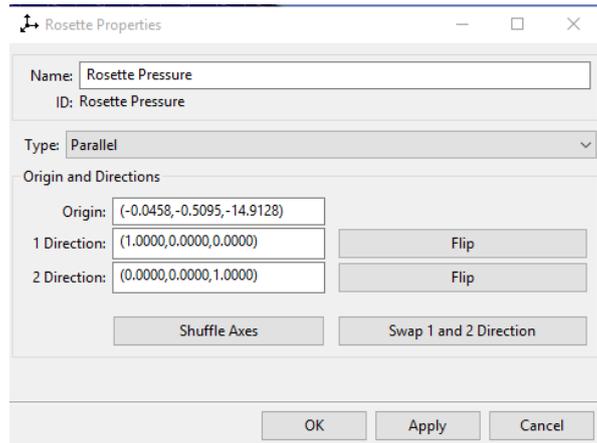
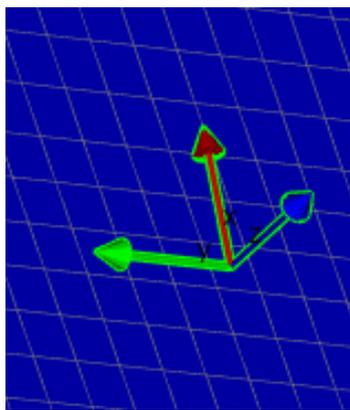


**Gambar 3. 33** *Element Sets* Pada Bagian *Tip* Bilah

Tahap selanjutnya yaitu pendefinisian arah *Rosettes* yang berfungsi sebagai sumbu acuan dalam *set-up* komposit. Sumbu x pada *Rosettes* berfungsi sebagai acuan orientasi  $0^\circ$  dari material komposit, sedangkan sumbu z adalah acuan dalam penyusunan lapisan komposit. Pada tahap pembuatan *rosettes* ini, dilakukan 2 buah pembuatan *rosettes*. Hal ini dikarenakan pertumbuhan dari komposit yang diinginkan pada bilah turbin angin berbeda arah, yaitu pertumbuhan komposit pada sisi bagian *suction* ke arah atas, pada sisi bagian *pressure* ke arah bawah, dan bagian *tip* ke arah dalam (arah sumbu z positif pada sumbu koordinat).

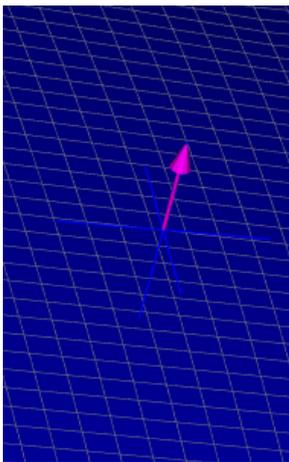


**Gambar 3. 34** Penentuan Sumbu *Rosettes* pada sisi *Suction* Bilah Turbin

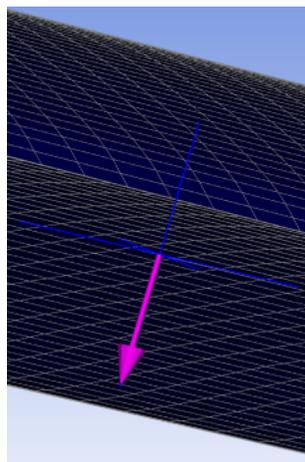


**Gambar 3. 35** Penentuan Sumbu *Rosettes* pada sisi *Suction* Bilah Turbin

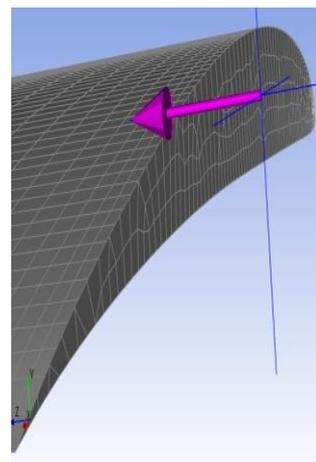
Tahap selanjutnya adalah pendefinisian *Oriented Selection Sets* atau OSS yang digunakan untuk menentukan arah bertumbuhnya komposit dan arahnya akan disesuaikan dengan sumbu Z pada OSS. Pada tahap ini dibuat dua buah OSS, yang dimana OSS pertama menggunakan *rosettes* bagian depan, dan OSS kedua menggunakan *rosettes* bagian belakang.



(a)



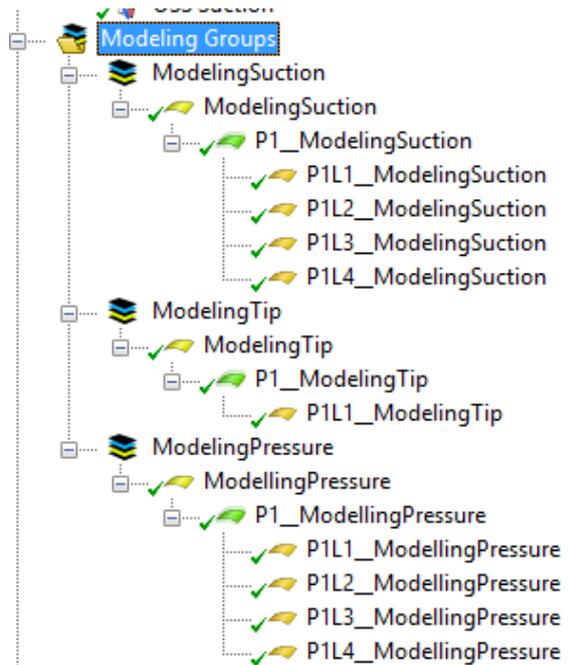
b)



(c)

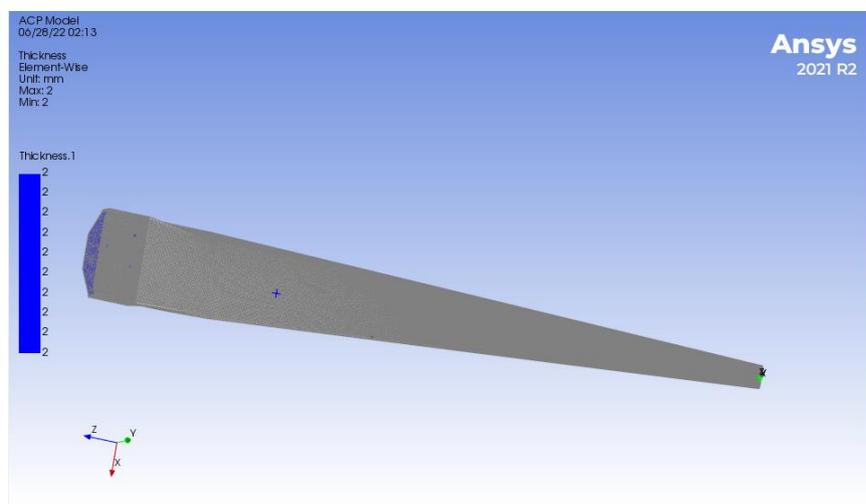
**Gambar 3. 36** Penentuan arah *Oriented Selection Sets* (OSS) Pada Bagian (a) Depan (b) Belakang (c) Tip Bilah Turbin Angin

Tahap terakhir pada *Set-up* Komposit di ACP (Pre) adalah *modelling group*. *Modelling group* bertujuan untuk menentukan jumlah lapisan/layer yang akan digunakan dalam penyusunan komposit pada *surface* bilah turbin yang telah dirancang. Dari langkah sebelumnya ditetapkan untuk orientasi sudut serat adalah  $[\pm 35^\circ]_2$  dengan jumlah *Stack up* yaitu 1 *Stack up* dan dibagi kedalam tiga *modelling ply* yaitu bagian sisi *pressure* bilah turbin angin, bagian sisi *suction* bilah turbin angin, dan bagian *tip* bilah turbin angin. Jumlah *layer* yang digunakan pada penelitian ini adalah sejumlah 4 *layer* untuk *pressure* dan *suction* serta 1 *layer* untuk bagian *tip*. Hal ini agar pertumbuhan komposit pada *surface* bilah turbin angin, tidak melebihi 2 mm sebagaimana yang telah ditetapkan dalam batasan masalah penelitian.



**Gambar 3. 37** *Modelling Group* dari Komposit

Setelah *modelling group* selesai, proses pengaturan ACP (Pre), dilakukan proses *solving* pada ACP-Pre sehingga mendapatkan hasil dari pemodelan laminasi komposit, yakni sebagai berikut.



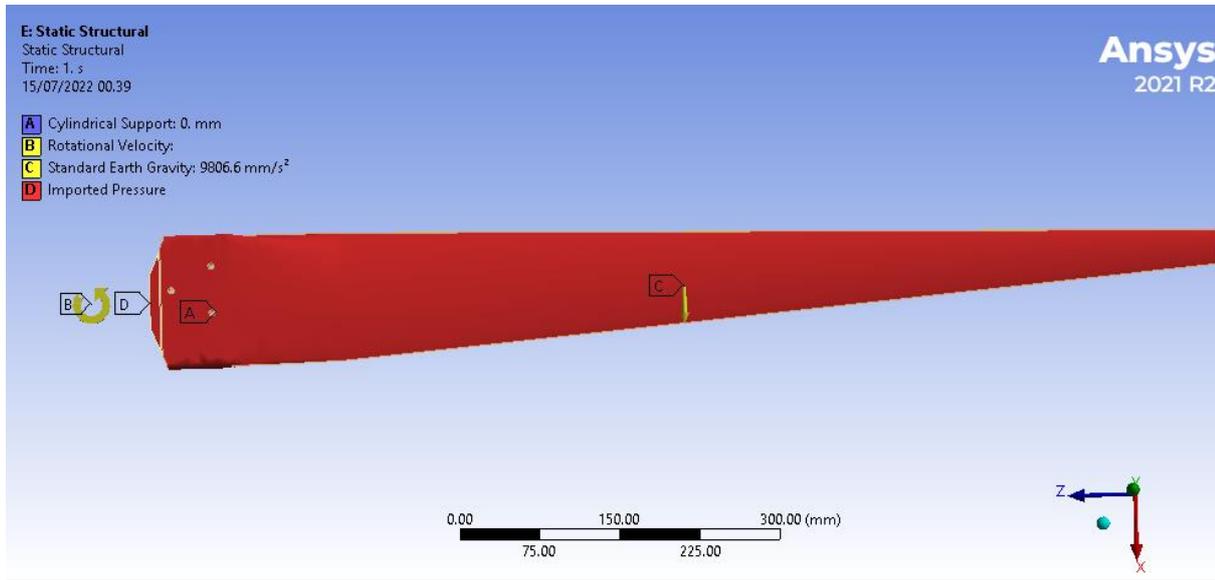
**Gambar 3. 38** Hasil Pemodelan Laminasi Komposit pada ACP (Pre)

Dari *set-up* komposit dengan ACP (Pre) didapatkan hasil seperti pada Gambar 3.37, didapatkan ketebalan dari *surface* bilah turbin angin dengan laminasi komposit *unidirectional* sisal-epoxy sebesar 2 mm.

#### 4. *Boundary Condition*

*Boundary condition* yang dilakukan pada penelitian ini dengan menggunakan beban aerodinamis yang didapatkan dari simulasi *fluent*, beban sentrifugal, dan beban gravitasi. Beban sentrifugal berasal dari gerakan putaran bilah, dan beban gravitasi adalah beban yang bekerja karena adanya pengaruh gaya gravitasi pada massa dari bilah turbin. Pada penelitian ini,

kecepatan putar rotor adalah 1000 rpm atau 104,72 rad/s dan gaya gravitasi yang diterapkan yakni sebesar 9806,6 mm/s<sup>2</sup>. Letak sumbu putar bilah disesuaikan dengan jarak sumbu putar terhadap shaft generator yakni sebesar 235 mm dari elemen 0. Kemudian *cylindrical support* diterapkan pada ketiga lubang pada pangkal bilah, dikarenakan *support* yang digunakan adalah baut. Berikut ini merupakan gambar dari *boundary condition* yang diterapkan dalam uji simulasi.



**Gambar 3. 39** *Boundary Condition* pada Simulasi Kekuatan Struktur Material Bilah Turbin

## 5. Uji Konvergensi

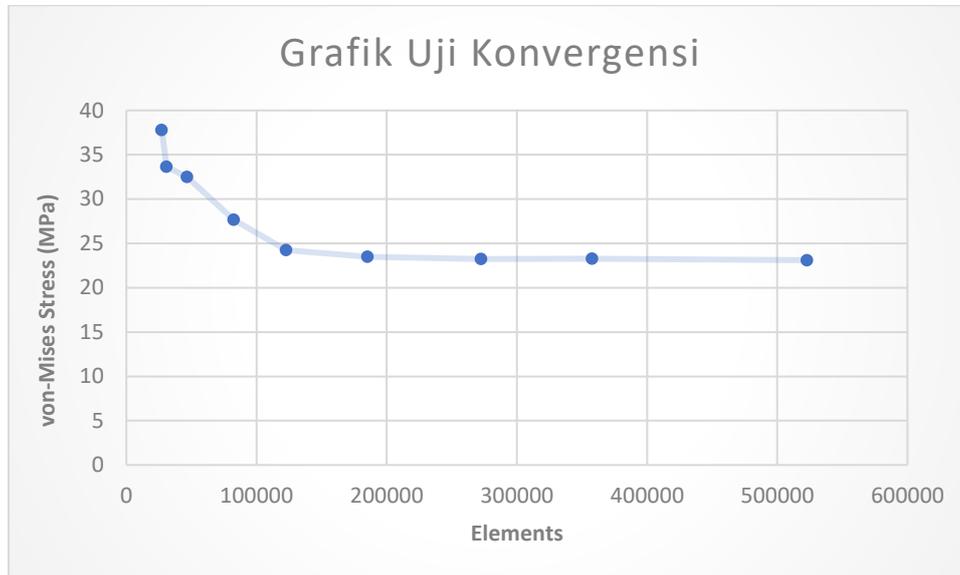
Setelah dilakukan pemodelan laminasi komposit pada bilah turbin angin, maka selanjutnya akan dilakukan proses *solving* dengan *input* tambahan dari Ansys Fluent yaitu *pressure distribution* dan melakukan *boundary condition* seperti yang telah dilakukan pada simulasi sebelumnya. Proses *solving* dilakukan dengan menggunakan *direct solver*. Hasil dari simulasi ini akan didapatkan hasil keluaran berupa nilai *maximum Von-Mises stress* yang terjadi pada bilah turbin angin. Nilai dari *maximum Von-Mises stress* akan menjadi tolak ukur perbandingan error antara ukuran *mesh* yang digunakan.

Untuk memastikan bahwa hasil telah konvergen, maka dilakukan uji konvergensi. Jumlah dan ukuran elemen yang akan diterapkan juga dapat diperoleh dari uji konvergensi. Uji konvergensi dilakukan secara manual dengan melakukan variasi ukuran elemen *meshing*. Berikut ini merupakan tabel dari uji konvergensi *mesh* yang dilakukan.

**Tabel 3. 10** Iterasi yang Dilakukan dalam Uji Konvergensi

Element Size (mm)	Elements	Skewness	Orthogonal Quality	Maximum Von-Mises Stress (MPa)	Error
5	27292	0,2434	0,81496	37,767	-
4,5	30976	0,2077	0,81799	33,643	11%
4	46793	0,13897	0,86386	32,484	3%
3,5	82421	0,1855	0,83201	27,657	15%
3	122748	0,1822	0,82955	24,241	12%
2,5	185314	0,1778	0,83197	23,481	3%

2	272447	0,1714	0,83462	23,241	1%
1,5	357823	0,17397	0,83242	23,259	0%
1	522912	0,16791	0,83917	23,108	1%



**Gambar 3. 40** Grafik Uji Konvergensi

Berdasarkan tabel diatas, didapatkan bahwa simulasi telah konvergen pada iterasi ke-7. Hal itu dibuktikan dengan nilai relative error yang sudah kecil. Oleh karena itu, dalam proses simulasi akan menggunakan iterasi ke-7 yakni dengan ukuran elemen *mesh* sebesar 2 mm.

### 3.10 Verifikasi

Verifikasi adalah metode yang digunakan untuk memastikan bahwa hasil yang didapatkan pada penelitian ini dapat dipertanggung jawabkan kebenarannya. Verifikasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah verifikasi untuk hasil *Rules of Mixture* dan *Blade Element Momentum Theory*.

#### 3.10.1 Rules of Mixtures

Berdasarkan penjelasan yang telah dipaparkan pada dasar teori, *rules of mixtures* merupakan salah satu metode untuk mengetahui nilai *properties* massa jenis, *shear modulus*, *Young modulus*, dan *poisson ratio* dari komposit. Metode ini akan penulis gunakan sebagai validasi dalam hasil simulasi mikrostruktur komposit dari *software* Material Designer. Nilai massa jenis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\rho_c = v_f \rho_f + v_m \rho_m$$

$$\rho_c = (0,7 \times 1450) + (0,3 \times 1160)$$

$$\rho_c = 1363 \text{ kg/mm}^3$$

Adapun nilai *longitudinal* dan *transverse* dari Young Modulus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$E_1 = v_f E_f + v_m E_m$$

$$E_1 = (0,7 \times 9,4) + (0,3 \times 3,78)$$

$$E_1 = 7,714 \text{ GPa} = 7714 \text{ MPa}$$

$$E_2 = \left( \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m} \right)^{-1}$$

$$E_2 = \frac{(E_f E_m)}{(V_f E_m + V_m E_f)}$$

$$E_2 = \frac{(9,4 \times 3,78)}{(0,7 \times 3,78 + 0,3 \times 9,4)}$$

$$E_2 = 6,5005 \text{ GPa} = 6500,5 \text{ MPa}$$

Sedangkan nilai *longitudinal* dan *transverse* dari *shear modulus* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$G_{12} = G_m \frac{(1 + V_f)G_f + V_m G_m}{V_m G_f + (1 + V_f)G_m}$$

$$G_{12} = 1,4 \frac{(1 + 0,7) \times 3,56 + 0,3 \times 1,4}{0,3 \times 3,56 + (1 + 0,7) \times 1,4}$$

$$G_{12} = 2,627 \text{ GPa} = 2627 \text{ MPa}$$

$$G_{23} = \frac{G_m K_m (G_m + G_f) + 2G_f G_m + K_m (G_f - G_m) V_f}{K_m (G_m + G_f) + 2G_f G_m - (K_m + 2G_m) (G_f - G_m) V_f}$$

$$G_{23} = \frac{1,4 \times 8,7 \times (1,4 + 3,56) + 2 \times 3,56 \times 1,4 + 8,7 \times (3,56 - 1,4) \times 0,7}{8,7 \times (1,4 + 3,56) + 2 \times 3,56 \times 1,4 - (8,7 + 2 \times 1,4) (3,56 - 1,4) \times 0,7}$$

$$G_{23} = 2,596 \text{ GPa} = 2596 \text{ MPa}$$

Untuk nilai *longitudinal* dan *transverse* dari Poisson's Ratio dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$v_{12} = V_f v_f + V_m v_m$$

$$v_{12} = 0,7 \times 0,32 + 0,3 \times 0,35$$

$$v_{12} = 0,329$$

$$v_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1$$

$$v_{23} = \frac{6994,6}{2 \times 2596} - 1$$

$$v_{23} = 0,346$$

Jika dibandingkan hasil *material designer* dengan hasil perhitungan teoritis *rules of mixtures* diatas, maka didapatkan error sebagaimana yang dijelaskan pada tabel dibawah ini.

Parameter	Hasil Material Designer	Hasil Perhitungan Teoritis ROM	Error
$\rho$	1363	1363	0 %
$E_1$	7714,7	7714,7	0 %
$E_2$	6994,4	6500,5	7,055 %
$G_{12}$	2631	2627	0,12 %
$G_{23}$	2603,6	2596	0,243 %
$\nu_{12}$	0,328	0,329	0,247 %
$\nu_{23}$	0,343	0,346	1,08 %

Berdasarkan hasil error di atas, dapat disimpulkan bahwa data yang didapatkan dengan menggunakan *software* material designer dapat digunakan dalam proses simulasi ini.

### 3.10.2 Blade Element Momentum Theory

Selanjutnya adalah verifikasi simulasi dari penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap teori yang telah ada. Teori *Blade Element Momentum* akan digunakan sebagai beban aerodinamika dan gaya sentrifugal yang disebabkan gerakan berputar bilah. Pada teori ini akan dilakukan penyederhanaan pada bilah dengan membagi bilah menjadi beberapa elemen. Penyederhanaan ini berfungsi untuk menentukan distribusi gaya dan torsi dari tiap elemen bilah saat menggunakan *Blade Element Momentum Theory*. Contoh perhitungan yang dilakukan akan menggunakan elemen bilah ke-3 sesuai dengan bilah yang telah dirancang. Langkah pertama adalah dengan menentukan nilai *flow angle* ( $\varphi$ ) lokal dari tiap elemen bilah dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{U_0}{\Omega_r} \right)$$

$$\varphi_3 = \tan^{-1} \left( \frac{17}{44,61} \right)$$

$$\varphi_3 = 20,86^\circ$$

*Angle of attack* lokal dari blade element dapat dicari sebagai berikut.

$$\alpha = \varphi - \gamma_\lambda$$

$$\alpha_3 = 20,86^\circ - 5,01^\circ$$

$$\alpha_3 = 15,85^\circ$$

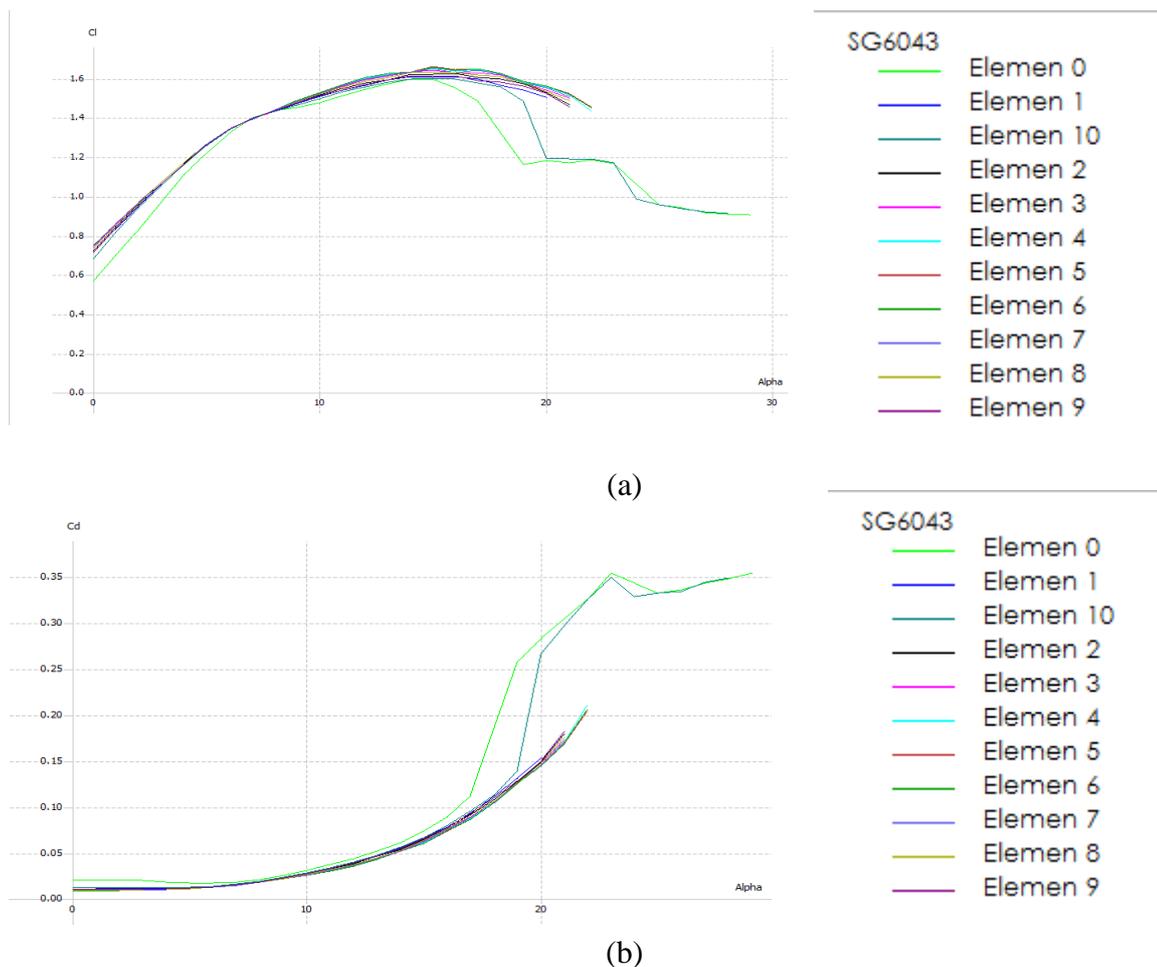
*Angle of attack* lokal pada tiap *blade element* juga dicari untuk mendapatkan nilai *lift coefficient* ( $C_L$ ) dan *drag coefficient* ( $C_D$ ) dengan hasil sebagai berikut.

**Tabel 3. 11** Nilai bilangan *Reynold* dan *Angle of Attack* pada tiap *Blade Element*

Element	r (m)	$U_0$ (m/s)	$\Omega_r$ (m/s)	$U_{rel}$ (m/s)	$c_\lambda$ (m)	Re	$\gamma_\lambda$	$\varphi$	$\alpha$
0	0,18	17	0	17	0,12	139656	7,11	90,00	0
1	0,262		27,43	32,27	0,111	245266	6,41	31,78	25,37
2	0,344		36,02	39,83	0,102	278149	5,71	25,26	19,56
3	0,426		44,61	47,74	0,093	303945	5,01	20,86	15,85
4	0,508		53,19	55,84	0,084	321156	4,31	17,72	13,42
5	0,59		61,78	64,08	0,075	329017	3,61	15,38	11,78

6	0,672	70,37	72,39	0,066	327105	2,90	13,58	10,68
7	0,754	78,95	80,76	0,057	315169	2,20	12,15	9,95
8	0,836	87,54	89,18	0,048	293051	1,50	10,99	9,49
9	0,918	96,13	97,62	0,039	260647	0,80	10,03	9,23
10	1	104,72	106,09	0,03	217885	0,10	9,22	9,12

Setelah *angle of attack* lokal didapat, *lift coefficient* ( $C_L$ ) dan *drag coefficient* ( $C_D$ ) dapat dicari dengan menggunakan *software* XFOIL. Kedua nilai tersebut dicari dengan bilangan *Reynold* dan *angle of attack* dari tiap *blade element*.



**Gambar 3. 41** Grafik  $C_L/\alpha$  (a) dan  $C_D/\alpha$  (b) dari tiap elemen

Berdasarkan hasil, dapat dilihat bahwa nilai  $C_L$  dan  $C_D$  terhadap  $\alpha$  tidak berbeda secara signifikan terhadap bilangan *Reynold*. Nilai  $C_L$  dan  $C_D$  terhadap variasi  $\alpha$  pada tiap elemen dapat juga dicari dengan melihat hasil grafik yang telah dihasilkan melalui simulasi XFOIL. Hasil nilai tersebut dirincikan sebagai berikut.

**Tabel 3. 12** Nilai Cl dan Cd pada Setiap Elemen Bilah

Elemen	Re	Alpha	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
0	139656	0	0,57	0,021
1	245266	25,37	1,08	0,329
2	278149	19,56	1,54	0,138
3	303945	15,85	1,63	0,0735
4	321156	13,42	1,62	0,0471
5	329017	11,78	1,59	0,034
6	327105	10,68	1,55	0,0283
7	315169	9,95	1,52	0,0253
8	293051	9,49	1,50	0,0237
9	260647	9,23	1,48	0,0231
10	217885	9,12	1,47	0,0236

Setelah itu sebelum menghitung gaya-gaya yang bekerja pada bilah, *Prandtl tip function* ( $f_\lambda$ ) perlu ditentukan sebagai faktor *tip loss correction* sebagai berikut.

$$F_\lambda(\varphi) := \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \exp \left( - \frac{\frac{B}{2} (1 - \frac{r}{R})}{(\frac{r}{R}) \sin \varphi} \right) \right)$$

$$F_3(\varphi) := \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \exp \left( - \frac{\frac{1}{2} (1 - \frac{0,18}{1})}{(\frac{0,18}{1}) \sin 20,86^\circ} \right) \right)$$

$$F_3(\varphi) := 0,90$$

Selanjutnya, gaya dan torsi yang bekerja pada *blade element* dikalkulasi menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$dN = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c \, dr$$

$$N_3 = \int_{r_2}^{r_3} F_3(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_3 \, dr$$

$$N_3 = (0,90) \frac{1}{2} 47,74^2 (1,63 \sin 20,86^\circ - 0,0735 \cos 20,86^\circ) 1,225 \cdot 0,093 (0,426 - 0,344)$$

$$N_3 = 5,45 \, N$$

$$dT = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda \, dr$$

$$T_3 = \int_{r_2}^{r_3} F_3(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_3 \, dr$$

$$T_3 = (0,90) \frac{1}{2} 47,74^2 (1,63 \cos 20,86^\circ + 0,0735 \sin 20,86^\circ) 1,225 \cdot 0,093 (0,426 - 0,344)$$

$$T_3 = 16,49 \, N$$

$$dM_x = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_\lambda r dr$$

$$M_{x3} = \int_{r_2}^{r_3} F_3(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi + C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi) \rho c_3 r dr$$

$$M_{x3} = (0,90 \frac{1}{2} 47,74^2 (1,63 \cos 20,86^\circ + 0,0735 \sin 20,86^\circ) 1,225 \cdot 0,093) (0,426^2 - 0,344^2)$$

$$Q_{x3} = 15,40 Nm$$

$$dM_y = F_\lambda(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_\lambda r dr$$

$$M_{y3} = \int_{r_2}^{r_3} F_3(\varphi) \frac{B}{2} U_{rel}^2 (C_L(\varphi - \gamma_\lambda) \sin \varphi - C_D(\varphi - \gamma_\lambda) \cos \varphi) \rho c_3 r dr$$

$$M_{y3} = (0,90 \frac{1}{2} 47,74^2 (1,63 \sin 20,86^\circ - 0,0735 \cos 20,86^\circ) 1,225 \cdot 0,093) (0,426^2 - 0,344^2)$$

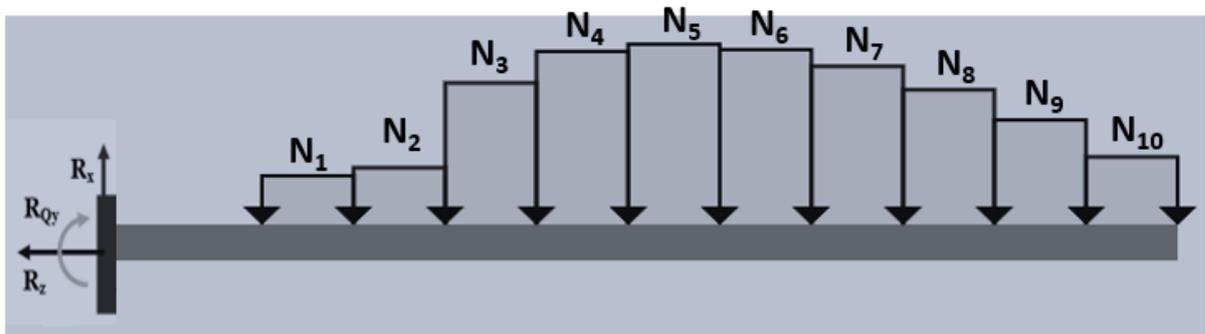
$$Q_{y3} = 5,09 Nm$$

Kalkulasi dilakukan pada seluruh elemen bilah dengan hasil sebagaimana yang tertera pada tabel 3.12.

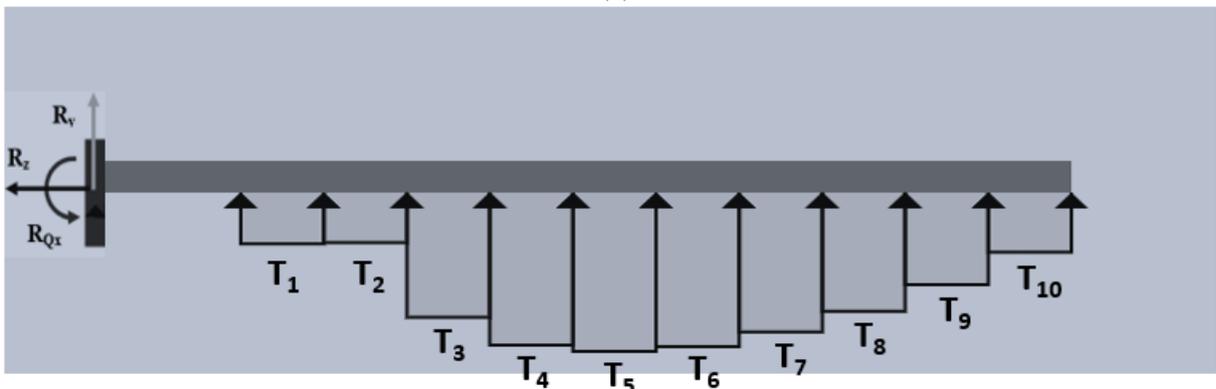
**Tabel 3. 13** Hasil Kalkulasi Gaya Aksial dan Torsi pada tiap Elemen Bilah

Element	r (m)	U <sub>rel</sub> (m/s)	φ	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	F	N (N)	T (N)	Q <sub>x</sub> (Nm)	Q <sub>y</sub> (Nm)
0	0,18	17	90,00	0,57	0,021	0,94	1,39	1,66	0,74	0,62
1	0,262	32,27	31,78	1,08	0,329	0,96	1,61	6,06	3,67	0,97
2	0,344	39,83	25,26	1,54	0,138	0,93	4,03	11,00	8,47	3,11
3	0,426	47,74	20,86	1,63	0,0735	0,90	4,93	14,91	13,93	4,60
4	0,508	55,84	17,72	1,62	0,0471	0,87	5,13	17,83	19,57	5,63
5	0,59	64,08	15,38	1,59	0,034	0,83	4,97	19,71	24,88	6,28
6	0,672	72,39	13,58	1,55	0,0283	0,77	4,50	20,25	28,88	6,42
7	0,754	80,76	12,15	1,52	0,0253	0,70	3,83	19,37	30,80	6,10
8	0,836	89,18	10,99	1,50	0,0237	0,59	2,98	16,78	29,43	5,23
9	0,918	97,62	10,03	1,48	0,0231	0,44	1,92	11,92	22,86	3,68
10	1	106,09	9,22	1,47	0,0236	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Untuk mendapatkan total gaya aksial dan torsi dari bilah, maka seluruh gaya aksial dan torsi elementer pada tiap elemen bilah dijumlahkan. Dengan didapaknya gaya aksial dan torsi dari tiap blade element, maka reaksi pada tumpuan kearah vertical dapat dihitung. Berikut perhitungan gaya reaksi tumpuan kearah vertical. *Freebody diagram* dari perhitungan gaya reaksi pada tumpuan dimodelkan menjadi sebuah beam yang diberikan *fixed support* pada salah satu sisinya. Gaya reaksi kemudian dihitung pada bidang XZ dan YZ dengan menggunakan hukum kesetimbangan. Maka dapat dimodelkan *freebody diagram* menjadi sebuah *beam* dengan gambar sebagai berikut.



(a)



(b)

**Gambar 3. 42** Pemodelan gaya (a) *Normal* pada bidang XZ (b) *Thrust* pada bidang YZ dari bilah turbin dalam sebuah *beam*

Nilai dari masing-masing gaya reaksi pada tumpuan dapat ditentukan melalui perhitungan berikut:

Gaya reaksi tumpuan kearah sumbu x ( $R_x$ )

$$\sum F_x = 0$$

$$R_x - N_0 - N_1 - N_2 - N_3 - N_4 - N_5 - N_6 - N_7 - N_8 - N_9 - N_{10} - W = 0$$

$$R_x = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9 + N_{10} + mg$$

$$R_x = 1,39 + 1,61 + 4,03 + 4,93 + 5,13 + 4,97 + 4,5 + 3,83 + 2,98 + 1,92 + 0$$

$$+ (1,002 \times 9,8)$$

$$R_x = 45,12 \text{ N}$$

Gaya reaksi tumpuan kearah sumbu y ( $R_y$ )

$$\sum F_y = 0$$

$$R_y + T_0 + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9 + T_{10} = 0$$

$$R_y = -T_0 - T_1 - T_2 - T_3 - T_4 - T_5 - T_6 - T_7 - T_8 - T_9 - T_{10}$$

$$R_y = -1,66 - 6,06 - 11 - 14,91 - 17,83 - 19,71 - 20,25 - 19,37 - 16,78 - 11,92 - 0$$

$$R_y = -139,50 \text{ N}$$

Gaya reaksi tumpuan kearah sumbu z ( $R_z$ )

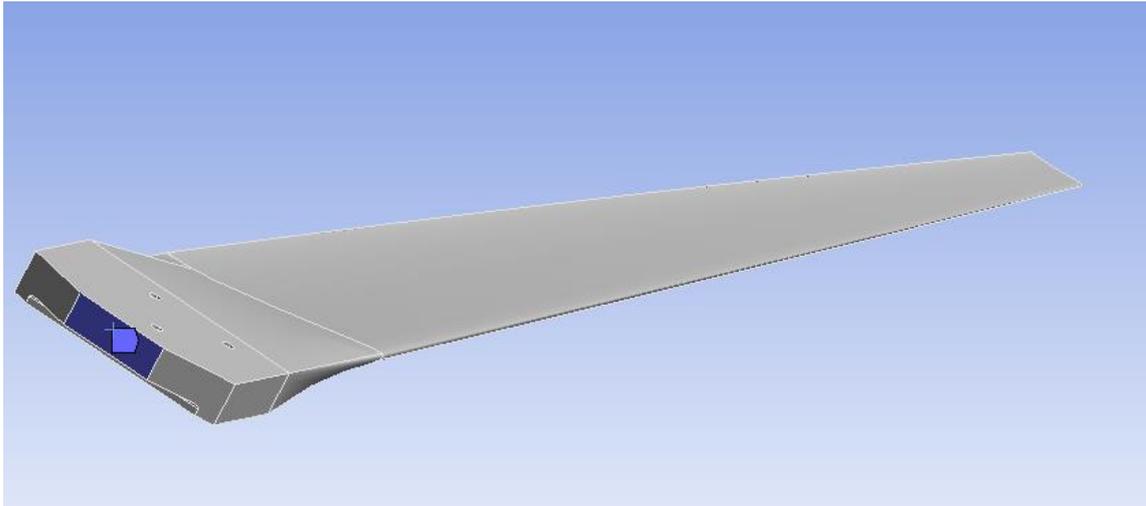
$$\begin{aligned}\sum F_z &= 0 \\ -R_z + m\omega^2 r &= 0 \\ R_z &= m\omega^2(r_{centroid} + r_{hub}) \\ R_z &= (1,002)(104,72^2)(0,07296 + 0,100) \\ R_z &= 1900,52 \text{ N}\end{aligned}$$

Gaya reaksi moment sumbu x ( $M_{Rx}$ )

$$\begin{aligned}\sum M_x &= 0 \\ M_{Rx} + M_{x0} + M_{x1} + M_{x2} + M_{x3} + M_{x4} + M_{x5} + M_{x6} + M_{x7} + M_{x8} + M_{x9} + M_{x10} &= 0 \\ M_{Rx} &= -M_{x0} - M_{x1} - M_{x2} - M_{x3} - M_{x4} - M_{x5} - M_{x6} - M_{x7} - M_{x8} - M_{x9} - M_{x10} \\ M_{Rx} &= 0,74 - 3,67 - 8,47 - 13,93 - 19,57 - 24,88 - 28,88 - 30,8 - 29,43 - 22,86 - 0 \\ M_{Rx} &= -182,49 \text{ N.m}\end{aligned}$$

Gaya reaksi moment sumbu y ( $M_{Ry}$ )

$$\begin{aligned}\sum M_y &= 0 \\ M_{Ry} + M_{y0} + M_{y1} + M_{y2} + M_{y3} + M_{y4} + M_{y5} + M_{y6} + M_{y7} + M_{y8} + M_{y9} + M_{y10} + mgr &= 0 \\ M_{Ry} &= -M_{y0} - M_{y1} - M_{y2} - M_{y3} - M_{y4} - M_{y5} - M_{y6} - M_{y7} - M_{y8} - M_{y9} - M_{y10} - mgr \\ M_{Ry} &= -0,62 - 0,97 - 3,11 - 4,6 - 5,63 - 6,28 - 6,42 - 6,1 - 5,23 - 3,68 - 0 \\ &\quad - (1,002 \times 9,8 \times 0,07296) \\ M_{Ry} &= -42,73 \text{ N.m}\end{aligned}$$



**Gambar 3. 43** Peletakan Titik Support dalam Mengetahui Force dan Moment Reaction

Details of "Force Reaction X"	
<b>Definition</b>	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
<b>Options</b>	
Result Selection	X Axis
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	40,909 N
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	40,909 N
<b>Information</b>	

(a)

Details of "Force Reaction Y"	
<b>Definition</b>	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
<b>Options</b>	
Result Selection	Y Axis
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Y Axis	-132,91 N
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Y Axis	-132,91 N
<b>Information</b>	

(b)

Details of "Force Reaction Z"	
<b>Definition</b>	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
<b>Options</b>	
Result Selection	Z Axis
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Z Axis	1865,9 N
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Z Axis	1865,9 N
<b>Information</b>	

(c)

Details of "Moment Reaction X"	
<b>Definition</b>	
Type	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Summation	Centroid
Suppressed	No
<b>Options</b>	
Result Selection	X Axis
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	-174,61 N-m
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	-174,61 N-m
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> X Axis	-174,61 N-m
<b>Information</b>	

(d)

Details of "Moment Reaction Y"	
<b>Definition</b>	
Type	Moment Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Summation	Centroid
Suppressed	No
<b>Options</b>	
Result Selection	Y Axis
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
<b>Results</b>	
<input type="checkbox"/> Y Axis	-40,654 N-m
<b>Maximum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Y Axis	-40,654 N-m
<b>Minimum Value Over Time</b>	
<input type="checkbox"/> Y Axis	-40,654 N-m
<b>Information</b>	

(e)

**Gambar 3. 44** Nilai gaya aksial reaksi (a) Sumbu-X (b) Sumbu-Y (c) Sumbu-Z dan gaya momen reaksi (d) Sumbu-X (e) Sumbu-Y hasil simulasi

Berdasarkan hasil kelima nilai pada reaksi tumpuan tersebut, maka error dari simulasi dapat dicari dengan melakukan perbandingan nilai reaksi pada tumpuan hasil perhitungan dan hasil simulasi. Adapun hasil error dari masing-masing nilai reaksi tumpuan adalah sebagai berikut.

- Error gaya reaksi sumbu-x

$$Er = \frac{F_{x\text{perhitungan}} - F_{x\text{simulasi}}}{F_{x\text{perhitungan}}} \times 100\%$$

$$Er = \frac{45,12 - 40,9}{45,12} \times 100\%$$

$$Er = 9,4 \%$$

- Error gaya reaksi sumbu-y

$$Er = \frac{F_{y\text{perhitungan}} - F_{y\text{simulasi}}}{F_{y\text{perhitungan}}} \times 100\%$$

$$Er = \frac{-139,5 - (-132,9)}{-139,5} \times 100\%$$

$$Er = 4,7 \%$$

- Error gaya reaksi sumbu-z

$$Er = \frac{F_{z\text{perhitungan}} - F_{z\text{simulasi}}}{F_{z\text{perhitungan}}} \times 100\%$$

$$Er = \frac{1900,52 - 1865,9}{1900,52} \times 100\%$$

$$Er = 1,8 \%$$

- Error moment reaksi sumbu-x

$$Er = \frac{M_{rx\text{perhitungan}} - M_{rx\text{simulasi}}}{M_{rx\text{perhitungan}}} \times 100\%$$

$$Er = \frac{-182,49 - (-174,61)}{-182,49} \times 100\%$$

$$Er = 4,3 \%$$

- Error moment reaksi sumbu-y

$$Er = \frac{M_{ry\text{perhitungan}} - M_{ry\text{simulasi}}}{M_{ry\text{perhitungan}}} \times 100\%$$

$$Er = \frac{-42,37 - (-40,65)}{-42,37} \times 100\%$$

$$Er = 4,1 \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan *error*, didapatkan bahwa error gaya reaksi menunjukkan persentase yang cukup rendah yakni error terbesar senilai 9,4 %. Error, ini disebabkan karena metode *Blade Element Momentum* berbasis asumsi fluida sebagai aliran yang *inviscid* dengan model *natural transition* sedangkan model turbulensi SST CFD. Sedangkan yang digunakan pada penelitian ini adalah  $k-\omega$  SST yang menggunakan model *fully turbulent*. Oleh karena itu, perhitungan menggunakan metode *Blade Element Momentum* mengabaikan efek *viscous* dari fluida yang mengalir, sehingga tidak dapat menangkap efek separasi dan vortex pada *tip* yang mungkin terdapat pada bilah. (Alkhabbaz, Yang, Weraakoon, & Lee, 2021)

Selain itu, efek segmentasi dari elemen dan interpolasi *polar data* juga berpengaruh terhadap akurasi dari perhitungan *Blade Element Momentum*. Segmentasi elemen pada bilah mengakibatkan beban angin yang terjadi pada bilah dari kontinu menjadi diskrit, sehingga distribusi beban akan menjadi kurang akurat. Ukuran dari domain fluida pada CFD juga berpengaruh terhadap hasil simulasi CFD dimana semakin besar domainnya maka semakin baik. Namun, hal tersebut membutuhkan biaya komputasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, error yang masih dibawah 10% masih dapat diterima karena efek dari simplifikasi model analitis yang telah dilakukan (Bangga, 2018).

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Perhitungan Geometri Perancangan Bilah

Pada parameter pertama ditetapkan efisiensi dari bilah *pre-eliminary design* adalah 0,4 dan 0,5 sedangkan nilai efisiensi dari transmisi, generator, dan controller digunakan berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan. Contoh perhitungan dilakukan dengan menggunakan efisiensi bilah yang diinginkan adalah 0,4.

$$K = \eta_{bilah} \cdot \eta_{generator} \cdot \eta_{transmisi} \cdot \eta_{controller}$$

$$K = 0,4 \times 0,9 \times 1 \times 0,9$$

$$K_{sistem} = 0,324$$

Lalu dihitung nilai dari daya angin yang dibutuhkan untuk mendapatkan daya yang diinginkan sebesar 500 watt yang dimana daya ini disesuaikan dengan spesifikasi turbin angin TSD-500, perhitungan dilakukan sebagai berikut.

$$W_a = \frac{W_e}{Efisiensi\ sistem}$$

$$W_a = \frac{500}{0,324}$$

$$W_a = 1543,2\ watt$$

Selanjutnya, dilakukan perhitungan luas sapuan yang diperlukan oleh bilah agar mampu menangkap daya angin sebesar 1543,21 *watt*. Perhitungan dilakukan sebagai berikut.

$$Luas\ Sapuan\ Bilah\ (A) = 2 \cdot \frac{W_a}{\rho \cdot v^3}$$

$$Luas\ Sapuan\ Bilah\ (A) = 2 \cdot \frac{1543,21}{1,225 \cdot (9)^3}$$

$$Luas\ Sapuan\ Bilah\ (A) = 3,456\ m^2$$

Langkah terakhir dalam perancangan parameter pertama adalah dengan menghitung jari-jari bilah yang diperlukan, yaitu sebagai berikut.

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$R = \sqrt{\frac{3,456}{\pi}} = 1,049\ m$$

**Tabel 4. 1** Hasil Perancangan Parameter Pertama

Kapabilitas Daya Listrik	Efisiensi					Daya Angin	V Avg	Luas Sapuan	Jari- Jari
	Bil ah	Trans misi	Gener ator	Contr oller	Siste m				
Watt	%	%	%	%	%	Watt	m/s	m	m
500	0,4	1,0	0,9	0,9	0,324	1543,21	9,0	3,456	1,049

	0,5				0,405	1234,57		2,765	0,938
--	-----	--	--	--	-------	---------	--	-------	-------

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan bahwa jari-jari yang dapat digunakan adalah 1,049 m apabila efisiensi *pre-eliminatory* desain bilah adalah 0,4 dan 0,938 m apabila efisiensi *pre-eliminatory* desain bilah adalah 0,5. Dari dua nilai jari-jari tersebut, penulis menetapkan untuk menggunakan jari-jari dengan panjang 1 m agar dapat memudahkan dalam proses manufaktur.

Kemudian, dalam penentuan parameter kedua didapatkan dengan hasil analisis software Xfoil. Analisis dilakukan untuk mencari *angle of attack* yang paling optimum dengan  $Cl/Cd$  yang paling tinggi. Analisis dilakukan pada  $Re = 250000$ , hal ini dikarenakan turbin angin dengan kapasitas 10 kW hanya akan mengalami  $Re$  sampai dengan 500000 (Piggott, 2011). Sehingga didapatkan nilai untuk parameter kedua adalah seperti pada tabel berikut.

**Tabel 4. 2** Hasil Perancangan Paramater Kedua

TAPER						
TSR	Airfoil	$Re$	$Cl/Cd$	Alpha	$Cl$	Jumlah Bilah (B)
7	SG6043	250000	109,1	5	1.26	3

Selanjutnya, dalam penentuan parameter ketiga dilakukan perhitungan untuk mencari nilai TSR dan jari-jari parsial, *flow angle*, *twist angle*, dan lebar *chord* dari bilah turbin angin yang akan dirancang. Adapun perhitungan akan dilakukan dengan contoh pada elemen ke-3 dari bilah.

$$r_{\text{parsial}} = \text{innermost station} + \left[ \left( \frac{R - \text{innermost station}}{n} \right) n_{\text{parsial}} \right]$$

$$r_3 = 0,18 + \left[ \left( \frac{1 - 0,18}{10} \right) 3 \right]$$

$$r_3 = 0,426 \text{ m}$$

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \lambda_R$$

$$\lambda_3 = \frac{0,426}{1} 7$$

$$\lambda_3 = 2,982$$

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r}$$

$$\phi_3 = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{2,982}$$

$$\phi_3 = 7,608$$

$$C_r = \frac{16\pi R \left( \frac{R}{r} \right)}{9\lambda_r^2 B C_l}$$

$$C_{r_3} = \frac{16\pi \times 1 \left( \frac{1}{0,426} \right)}{9 \times 2,982^2 \times 1 \times 1,26}$$

$$C_{r_3} = 0,071$$

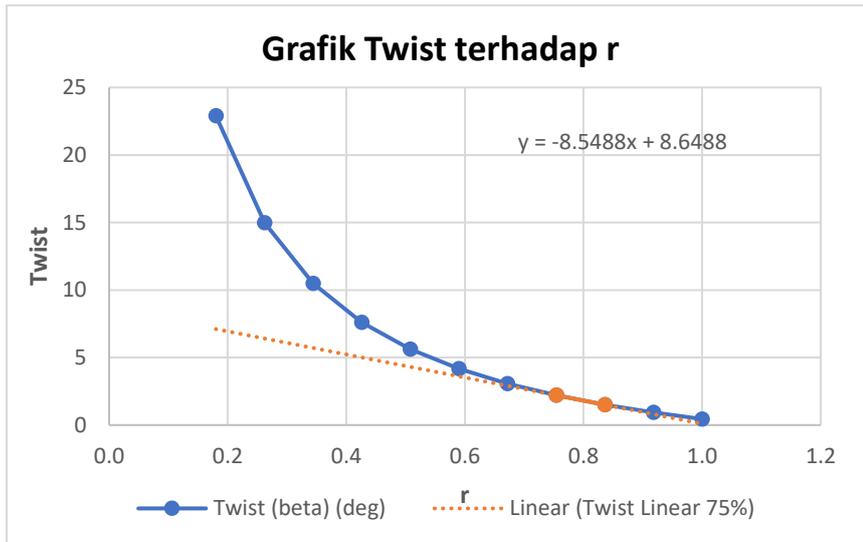
Setelah melakukan perhitungan diatas maka didapatkan hasil tabel sebagaimana yang ada di bawah ini.

**Tabel 4. 3** Hasil Perancangan Parameter Ketiga

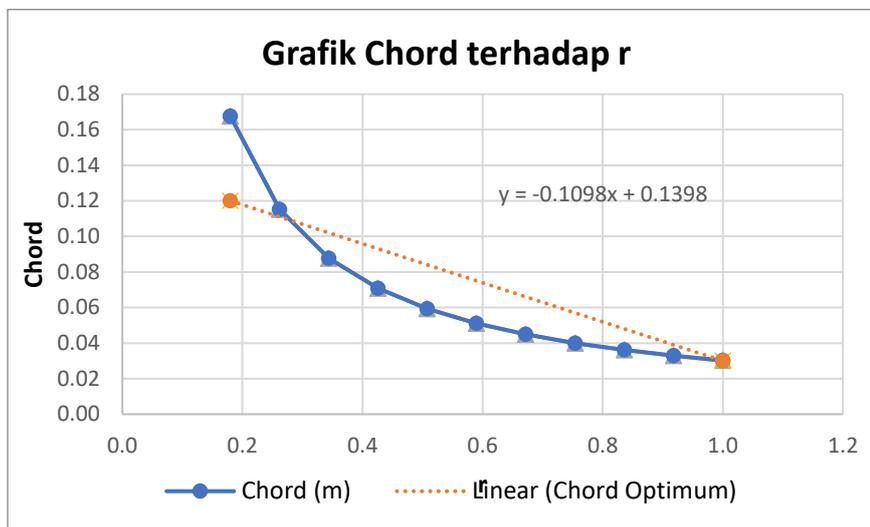
Elemen	r	TSR Parsial	Flow Angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Chord (m)
0	0,180	1,260	27,897	22,897	0,168
1	0,262	1,834	19,987	14,987	0,115
2	0,344	2,408	15,483	10,483	0,088
3	0,426	2,982	12,608	7,608	0,071
4	0,508	3,556	10,624	5,624	0,059
5	0,590	4,130	9,174	4,174	0,051
6	0,672	4,704	8,071	3,071	0,045
7	0,754	5,278	7,203	2,203	0,040
8	0,836	5,852	6,502	1,502	0,036
9	0,918	6,426	5,926	0,926	0,033
10	1,000	7,000	5,443	0,443	0,030

Dalam proses manufaktur, *twist angle* atau sudut puntir dan *chord* sangat memengaruhi kemudahan dalam proses manufaktur. Maka dari itu, perlu dilakukan linearisasi dari sudut puntir dan *chord* untuk memudahkan proses manufaktur bilah. Untuk kasus sudut puntir, dilakukan linearisasi di bagian elemen ke 7 dan 8 karena nilai dari sudut puntir pada elemen ini merupakan nilai sudut puntir yang optimal. Kemudian, untuk kasus *chord* dilakukan linearisasi pada elemen ke-0 dan elemen ke-10 untuk memudahkan dalam proses manufaktur. Nilai *chord* pada elemen ke-0 dipilih angka 0,12 m dan pada elemen ke-10 dipilih angka 0,03 m. (Inayah, Modul Pengenalan Turbin Angin Skala Mikro Lentera Bumi Nusantara, 2020)

Proses linearisasi dilakukan dengan menggunakan Microsoft Excel dengan melakukan *add trendline* pada 2 titik yang telah ditentukan. Hasil linearisasi didapatkan sebagaimana pada grafik dibawah ini.



**Gambar 4. 1** Grafik Linearisasi *Twist Angle*



**Gambar 4. 2** Grafik Linearisasi *Chord*

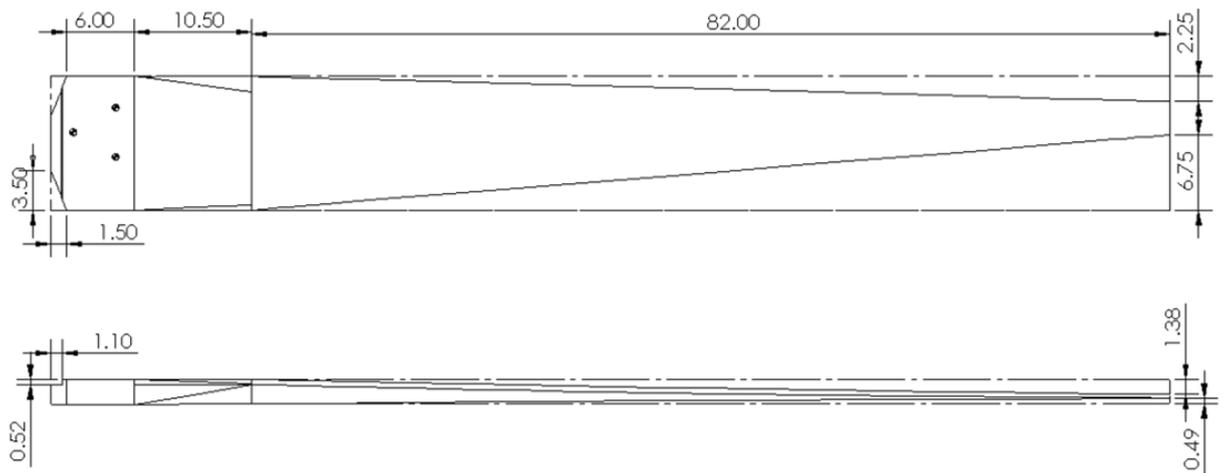
Setelah melakukan proses linearisasi, maka didapatkan parameter perancangan geometri dari bilah turbin *taper* seperti berikut ini.

**Tabel 4. 4** Hasil Perancangan Geometri Bilah

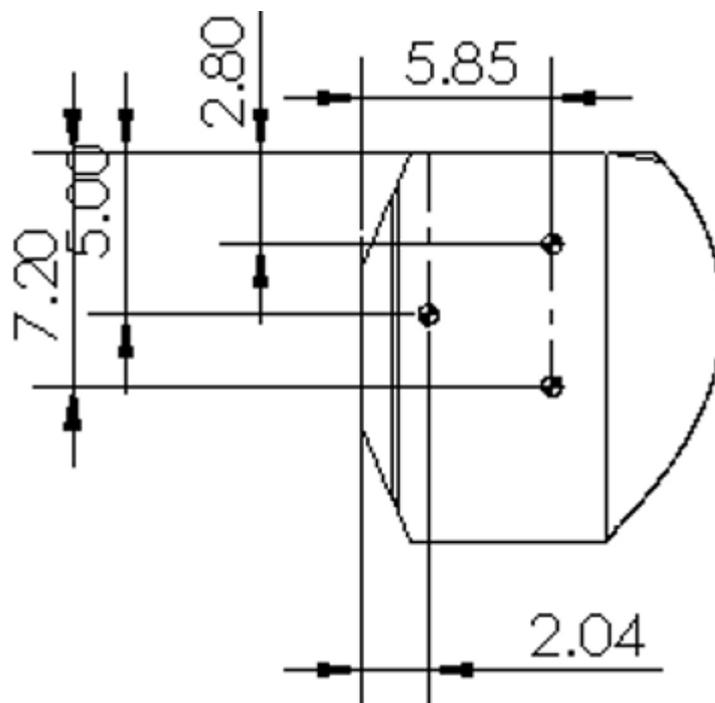
Elemen	r	TSR Parsial	Flow Angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Twist Linear 75%	Twist Optimum	Chord (m)	Chord Linear 12 cm	Chord Optimum
0	0,180	1,260	27,897	22,897		7,110	0,168	0,12	0,120
1	0,262	1,834	19,987	14,987		6,409	0,115		0,111
2	0,344	2,408	15,483	10,483		5,708	0,088		0,102
3	0,426	2,982	12,608	7,608		5,007	0,071		0,093
4	0,508	3,556	10,624	5,624		4,306	0,059		0,084
5	0,590	4,130	9,174	4,174		3,605	0,051		0,075
6	0,672	4,704	8,071	3,071		2,904	0,045		0,066

7	0,754	5,278	7,203	2,203	2,203	2,203	0,040		0,057
8	0,836	5,852	6,502	1,502	1,502	1,502	0,036		0,048
9	0,918	6,426	5,926	0,926		0,801	0,033		0,039
10	1,000	7,000	5,443	0,443		0,100	0,030	0,03	0,030

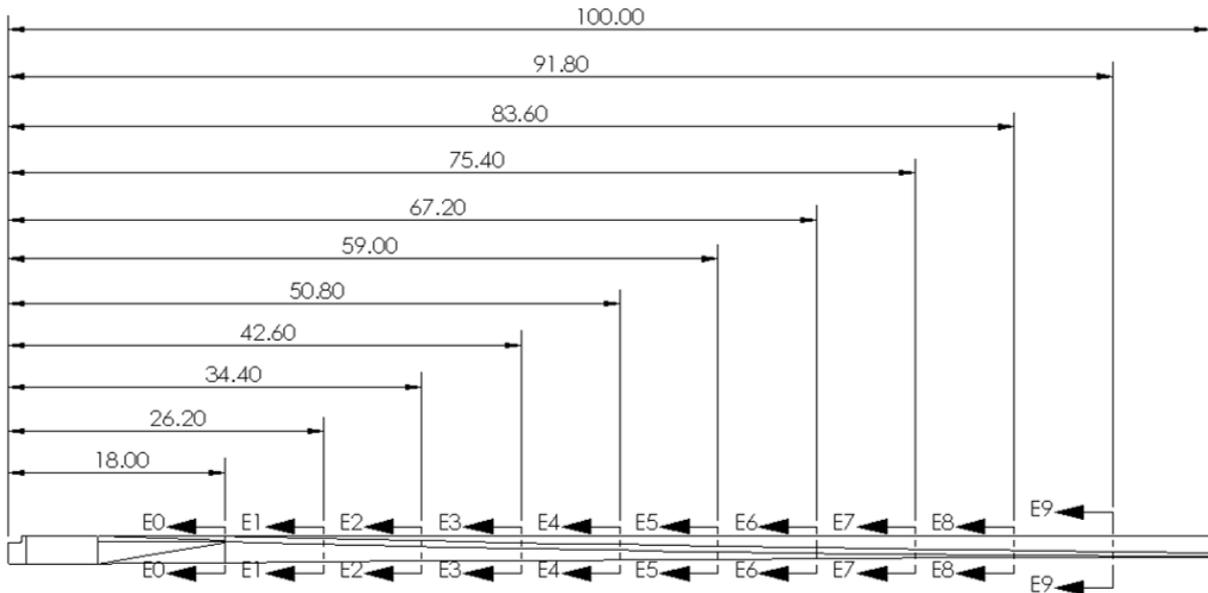
Berdasarkan parameter perancangan tersebut, maka didapatkan gambar teknik bilah turbin angin *taper* adalah sebagai berikut.



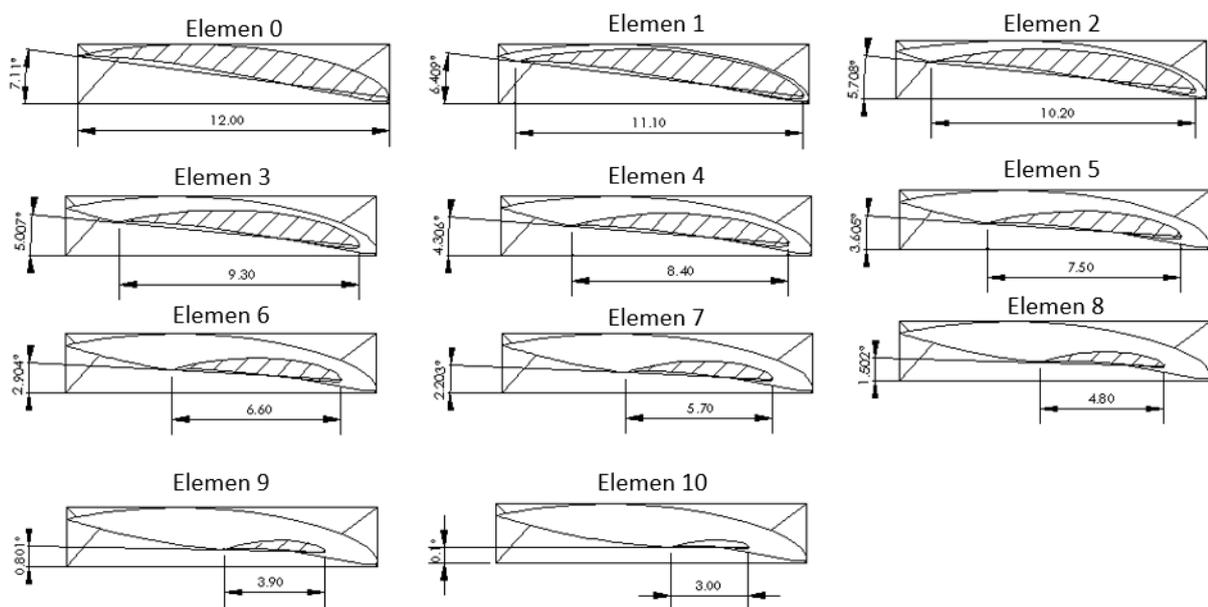
**Gambar 4. 3** Gambar Teknik 2D Bilah Turbin Angin TSD-500



**Gambar 4. 4** Gambar Teknik 2D Pangkal Bilah Turbin Angin TSD-500



Gambar 4.5 Jarak antar-elemen pada Bilah



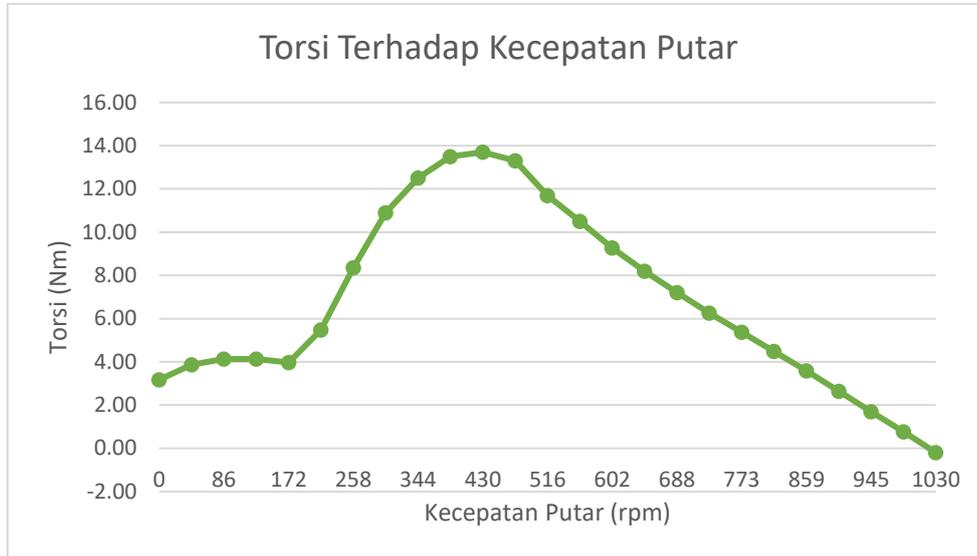
Gambar 4.6 Parameter Tiap Elemen Bilah

#### 4.2 Analisis Performa Bilah

Dalam sub bab ini akan dibahas terkait performa bilah yang telah dirancang pada penelitian ini. Rancangan bilah yang dibuat dengan menggunakan *airfoil* SG-6043, memiliki jari jari bilah 1 meter, dan memiliki jenis *taper*. Proses analisis performa bilah dilakukan pada kecepatan rata-rata angin yang sesuai dengan perancangan yakni sebesar 9 m/s. Analisis dilakukan dengan menggunakan *software* X-Foil Qblade.

#### 4.2.1 Torsi terhadap Kecepatan Putar

Grafik pertama yang dibutuhkan dalam menganalisis hasil performa bilah adalah dengan mengetahui nilai torsi terhadap kecepatan putar. Berikut ini merupakan grafik dari torsi terhadap kecepatan putar pada bilah turbin.

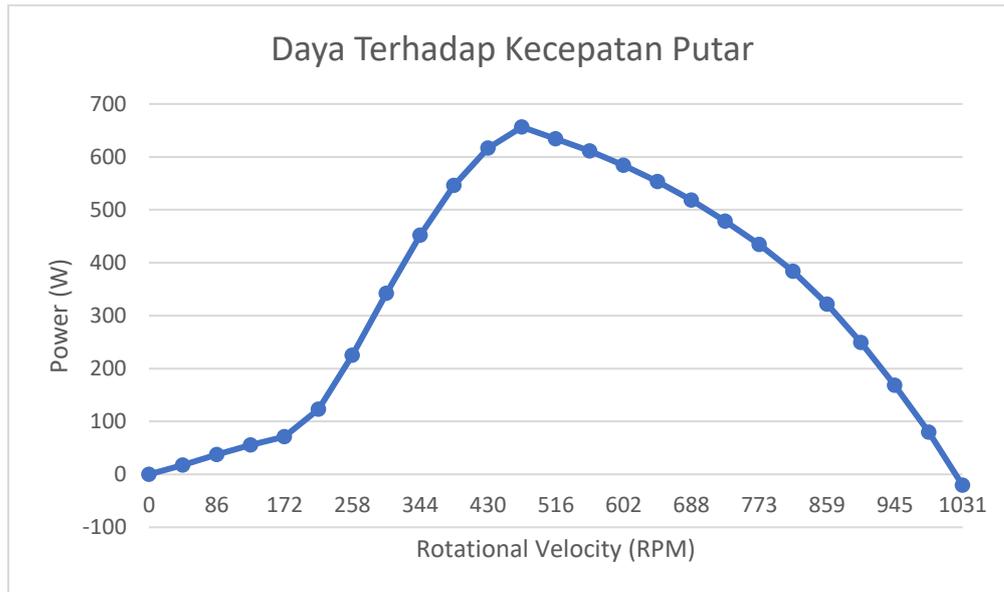


**Gambar 4. 7** Grafik Torsi terhadap Kecepatan Putar

Grafik diatas merupakan grafik torsi terhadap kecepatan putar yang didapatkan melalui hasil simulasi X-Foil. Grafik ini mempresentasikan kemampuan bilah berputar pada porosnya. Berdasarkan kurva tersebut, ditunjukkan bahwa torsi pada turbin angin mulai meningkat pada kecepatan putar 0 rpm hingga 430 rpm. Torsi maksimum didapatkan pada saat kecepatan putar 430 rpm dengan sebesar 13,7 Nm. Selanjutnya, nilai torsi pada turbin angin perlahan-lahan mengalami penurunan saat kecepatan putar 473 dan nilai torsi mengalami nilai 0 pada saat kecepatan putar 1030 rpm. Penurunan ini terjadi karena adanya peningkatan rugi-rugi mekanik pada saat turbin angin memiliki kecepatan putar yang lebih tinggi dari titik optimal.

#### 4.2.2 Daya terhadap Kecepatan Putar

Grafik kedua yang dibutuhkan dalam menganalisis hasil performa bilah adalah dengan mengetahui nilai daya terhadap kecepatan putar. Berikut ini merupakan grafik dari daya terhadap kecepatan putar pada bilah turbin.

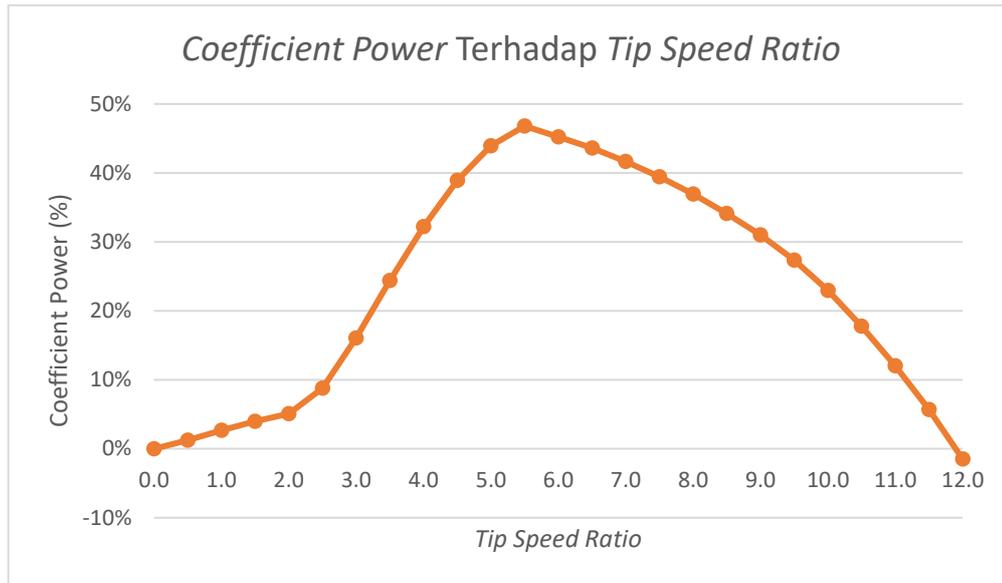


**Gambar 4. 8** Grafik Daya terhadap Kecepatan Putar

Kurva diatas mempresentasikan daya yang dihasilkan pada bilah yang telah dirancang. Pada kurva ini, menjelaskan bahwa daya mulai meningkat dari kecepatan putar 0 rpm sampai 473 rpm. Daya maksimum yang dihasilkan pada kecepatan putar 473 rpm adalah sebesar 656,5 Watt. Besarnya daya ini tidak melebihi daya yang dirancang yaitu sebesar 1402,02 Watt. Sehingga, nilai *coefficient performance* dari turbin angin dapat dihitung dengan membagi antara daya maksimum turbin dan daya angin yang telah dirancang yaitu sebesar 0,47. Hal ini sesuai dengan teori Betz *limit* yang dimana turbin angin memiliki efisiensi maksimum tidak akan lebih dari 0,592. Daya yang dihasilkan selanjutnya akan mulai menurun secara perlahan-lahan seiring meningkatnya kecepatan putar. Daya mulai menurun pada kecepatan putar 516 rpm dan akan berhenti pada kecepatan putar 1031 rpm.

#### 4.2.3 Coefficient Power terhadap Tip Speed Ratio

Grafik ketiga yang dibutuhkan dalam menganalisis hasil performa bilah adalah dengan mengetahui nilai *coefficient power* terhadap *Tip Speed Ratio*. Berikut ini merupakan grafik dari nilai *coefficient power* terhadap *Tip Speed Ratio* pada bilah turbin.



**Gambar 4.9** Grafik *Coefficient Power* terhadap *Tip Speed Ratio*

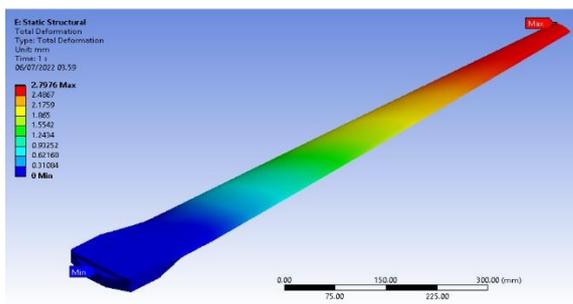
Kurva diatas menjelaskan terkait kinerja turbin angin seiring dengan bertambahnya TSR. Berdasarkan kurva tersebut didapatkan bahwa titik maksimal nilai *coefficient performance* turbin angin sebesar 0,47 terletak pada nilai TSR 5,5. Hal ini sesuai dengan teori yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwasanya turbin angin umumnya memiliki nilai TSR optimal berada pada rentang 5-7. Hasil analisa pada kurva ini menjelaskan bahwa nilai *coefficient performance* akan meningkat dari TSR 0 sampai dengan TSR 5,5. Setelah nilai *coefficient power* telah mencapai titik maksimum, maka akan terjadi penurunan efisiensi seiring bertambahnya nilai TSR. Nilai *coefficient power* akan memiliki nilai 0 pada TSR 12.

### 4.3 Hasil Simulasi Kekuatan Struktur Material

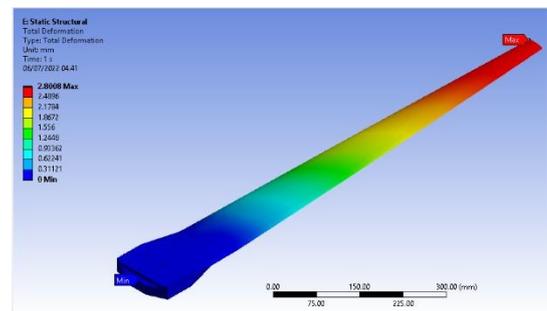
Dalam menganalisis kekuatan sisal-*epoxy* sebagai material pada bilah turbin, maka akan dilakukan simulasi untuk mendapatkan nilai dari total deformasi, tegangan von-Mises, nilai kegagalan Tsai Wu, dan nilai *safety factor* pada bilah turbin angin.

#### 4.3.1 Total Deformasi terhadap Variasi Sudut Orientasi Komposit

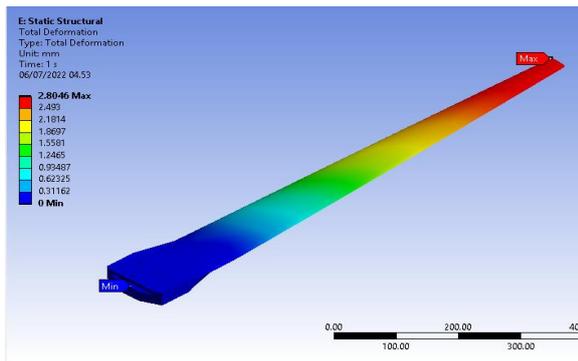
Hasil nilai dari total deformasi yang terjadi pada bilah dengan variasi susunan orientasi sudut komposit dapat dilihat pada gambar 4.6.



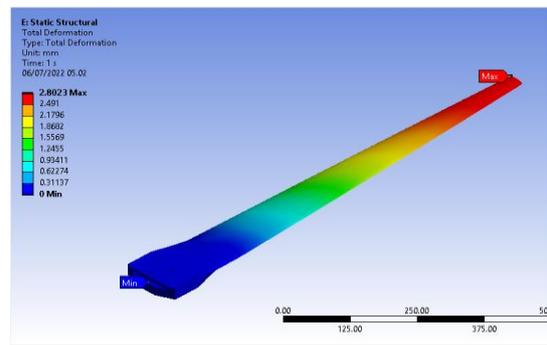
(a)



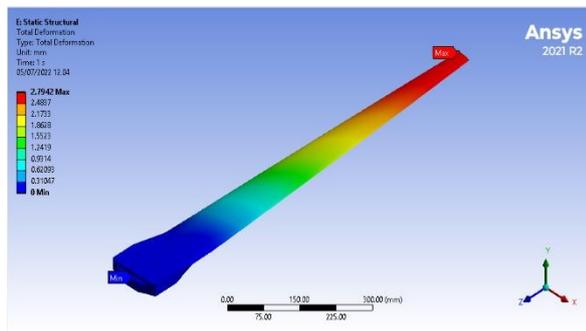
(b)



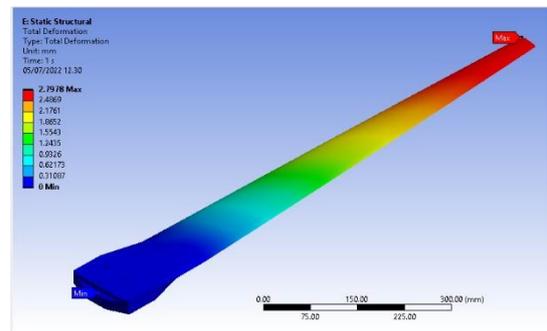
(c)



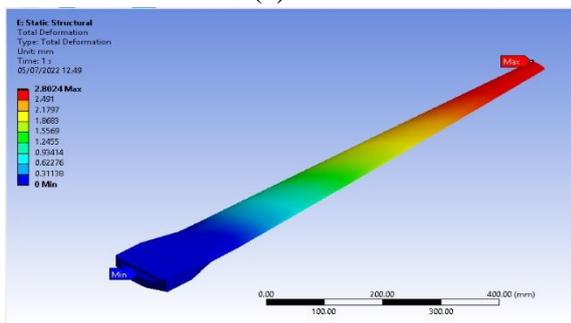
(d)



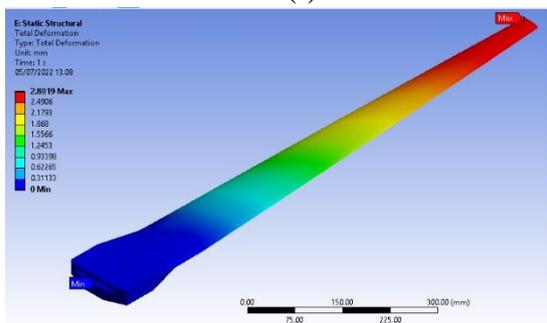
(e)



(f)



(g)



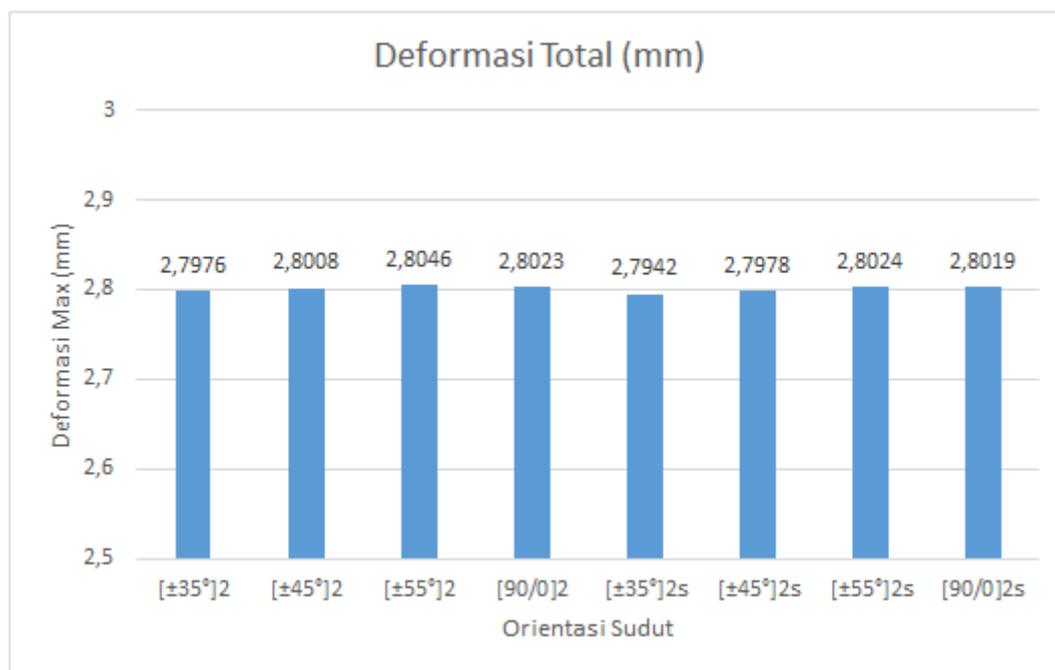
(h)

**Gambar 4. 10** Hasil Simulasi Nilai Total Deformasi dengan Sudut Orientasi (a)  $[\pm 35^\circ]_2$  (b)  $[\pm 45^\circ]_2$  (c)  $[\pm 55^\circ]_2$  (d)  $[90^\circ/0^\circ]_2$  (e)  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  (f)  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  (g)  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  (h)  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$

**Tabel 4. 5** Hasil Simulasi Nilai Total Deformasi pada Setiap Variasi Orientasi Sudut Serat

Orientasi Sudut	Hasil Deformasi (mm)
$[\pm 35^\circ]_2$	2,7976
$[\pm 45^\circ]_2$	2,8008
$[\pm 55^\circ]_2$	2,8046
$[90^\circ/0^\circ]_2$	2,8023
$[\pm 35^\circ]_{2s}$	2,7942
$[\pm 45^\circ]_{2s}$	2,7978

$[\pm 55^\circ]_{2s}$	2,8024
$[90^\circ/0^\circ]_{2s}$	2,8019



**Gambar 4.11** Chart Hasil Simulasi Deformasi Total Terhadap Variasi Orientasi Sudut Serat

Berdasarkan data dari hasil simulasi pada bilah turbin angin dengan kecepatan angin 17 m/s yang ditunjukkan pada tabel 4.5 di atas, diketahui penggunaan serat sisal-*epoxy* pada bilah turbin angin dengan penyusunan material komposit untuk orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_2$  didapatkan nilai deformasi maksimum yang dialami oleh bilah sebesar 2,7976 mm. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 45^\circ]_2$  didapatkan nilai deformasi maksimum yang dialami oleh bilah sebesar 2,8008 mm. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut  $[\pm 55^\circ]_2$  didapatkan nilai deformasi maksimum yang dialami oleh bilah sebesar 2,8046 mm. Untuk orientasi kombinasi sudut  $[90^\circ/0^\circ]_2$  didapatkan nilai deformasi maksimum yang dialami oleh bilah sebesar 2,8023 mm.

Sedangkan pada material komposit sisal-*epoxy* yang disusun dengan susunan simetrik, untuk orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai deformasi maksimum yang dialami oleh bilah sebesar 2,7942 mm. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai deformasi maksimum yang dialami oleh bilah sebesar 2,7978 mm. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai deformasi maksimum yang dialami oleh bilah sebesar 2,8024 mm. Untuk kombinasi sudut  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai deformasi maksimum yang dialami oleh bilah sebesar 2,8019 mm.

Berdasarkan nilai-nilai tersebut, nilai deformasi tertinggi didapatkan pada variasi  $[\pm 55^\circ]_2$  yakni sebesar 2,8046 mm dan deformasi paling rendah didapat pada variasi  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  yakni sebesar 2,7942 mm. Disamping itu, terlihat jika susunan serat yang simetrik lebih baik jika dibandingkan dengan susunan serat asimetrik. Hal ini dibuktikan dengan sudut serat yang sama namun disusun secara simetrik memiliki nilai deformasi yang lebih kecil jika dibandingkan dengan susunan serat asimetrik. Nilai total deformasi dari material dipengaruhi dari kekakuan dari penyusunan komposit, berdasarkan teori menyatakan bahwa hubungan antara kekakuan dengan deformasi adalah berbanding terbalik. Semakin kecil kekakuan dari material maka akan semakin besar nilai deformasi dari material. Akan tetapi, semakin besar

kekakuan dari material maka akan semakin kecil nilai deformasi dari material. dalam kondisi untuk penelitian ini, kekakuan yang dimiliki dari kombinasi orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_2$  memiliki nilai kekakuan yang paling optimal dibandingkan dengan yang lain, sehingga nilai total deformasi yang terjadi pada kombinasi ini minimum.

Perbedaan dari nilai deformasi yang didapatkan antar-orientasi sudut sangatlah kecil. Hal ini disebabkan oleh sedikitnya jumlah layer yang menyebabkan perbedaan nilai dari matriks *stiffness* ABD pun kecil. Oleh karena itu, nilai dari *strain* yang dimiliki pada masing-masing orientasi sudut komposit pun berbeda kecil. Hal ini lah yang menyebabkan nilai dari total deformasi antara orientasi sudut pun berbeda kecil. Adapun untuk perbandingan antara sudut asimetrik dan simetrik, didapatkan bahwa nilai total deformasi lebih kecil terdapat pada orientasi sudut yang simetrik. Hal ini disebabkan oleh orientasi sudut simetrik memiliki nilai 0 pada matriks B (*coupling stiffness matrix*) sehingga tidak terjadi distorsi dan *warpage* (kerutan). Adapun nilai dari matriks *stiffness* ABD untuk masing-masing orientasi sudut dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

➤ Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut  $[\pm 35^\circ]_2$

$$\begin{bmatrix} 16273,95 & 5392,122 & 0 & 0 & 0 & 125,8 \\ 5392,12 & 15729,18 & 0 & 0 & 0 & 66,09 \\ 0 & 0 & 5569,8 & 125,8 & 66,09 & 0 \\ 0 & 0 & 125,8 & 5424,65 & 1797,37 & 167,74 \\ 0 & 0 & 66,09 & 1797,37 & 5243,06 & 88,12 \\ 125,8 & 66,09 & 0 & 167,74 & 88,12 & 1856,60 \end{bmatrix}$$

➤ Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut  $[\pm 45^\circ]_2$

$$\begin{bmatrix} 15944,14 & 5426,49 & 0 & 0 & 0 & 99,68 \\ 5426,49 & 15944,14 & 0 & 0 & 0 & 99,68 \\ 0 & 0 & 5603,989 & 99,68 & 99,68 & 0 \\ 0 & 0 & 99,68 & 5314,71 & 1808,83 & 132,90 \\ 0 & 0 & 99,68 & 1808,83 & 5314,71 & 132,90 \\ 99,68 & 99,68 & 0 & 132,90 & 132,90 & 1867,99 \end{bmatrix}$$

➤ Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut  $[\pm 55^\circ]_2$

$$\begin{bmatrix} 15729,17 & 5392,12 & 0 & 0 & 0 & 61,79 \\ 5392,12 & 16273,95 & 0 & 0 & 0 & 121,5 \\ 0 & 0 & 5569,8 & 61,79 & 121,5 & 0 \\ 0 & 0 & 61,79 & 5243,05 & 1797,37 & 82,39 \\ 0 & 0 & 121,5 & 1797,37 & 5424,65 & 162 \\ 61,79 & 121,5 & 0 & 82,39 & 162 & 1856,6 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut  $[90^\circ/0^\circ]_2$

$$\begin{bmatrix} 16299,15 & 5084,4 & 0 & -199,48 & 0 & 0 \\ 5084,4 & 16299,15 & 0 & 0 & 199,48 & 0 \\ 0 & 0 & 5262 & 0 & 0 & 0 \\ -199,48 & 0 & 0 & 5167,07 & 1694,8 & 0 \\ 0 & 199,48 & 0 & 1694,8 & 5699,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1754 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut  $[\pm 35^\circ]_{2s}$

$$\begin{bmatrix} 16273,95 & 5392,122 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5392,12 & 15729,18 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5569,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5424,65 & 1797,37 & 167,74 \\ 0 & 0 & 0 & 1797,37 & 5243,06 & 88,12 \\ 0 & 0 & 0 & 167,74 & 88,12 & 1856,60 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut  $[\pm 45^\circ]_{2s}$

$$\begin{bmatrix} 15944,14 & 5426,49 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5426,49 & 15944,14 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5603,989 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5314,71 & 1808,83 & 132,90 \\ 0 & 0 & 0 & 1808,83 & 5314,71 & 132,90 \\ 0 & 0 & 0 & 132,90 & 132,90 & 1867,99 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut  $[\pm 55^\circ]_{2s}$

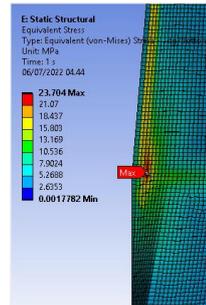
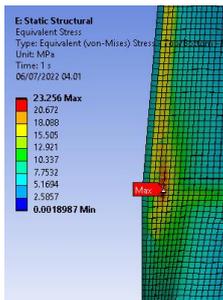
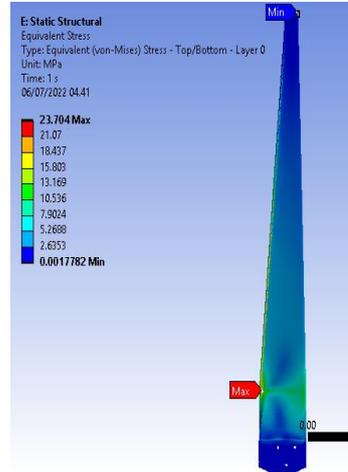
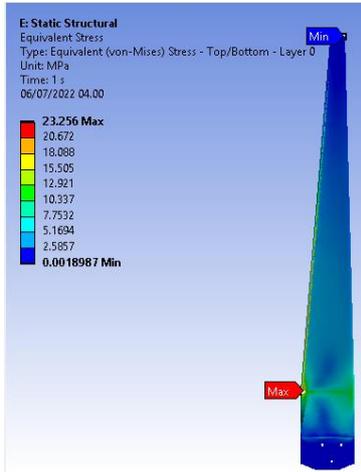
$$\begin{bmatrix} 15729,17 & 5392,12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5392,12 & 16273,95 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5569,8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5243,05 & 1797,37 & 82,39 \\ 0 & 0 & 0 & 1797,37 & 5424,65 & 162 \\ 0 & 0 & 0 & 82,39 & 162 & 1856,6 \end{bmatrix}$$

- Matriks *Stiffness* ABD untuk Orientasi Sudut  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$

$$\begin{bmatrix} 16299,15 & 5084,4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5084,4 & 16299,15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5262 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5167,07 & 1694,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1694,8 & 5699,02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1754 \end{bmatrix}$$

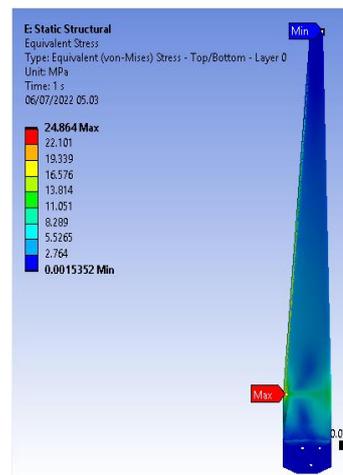
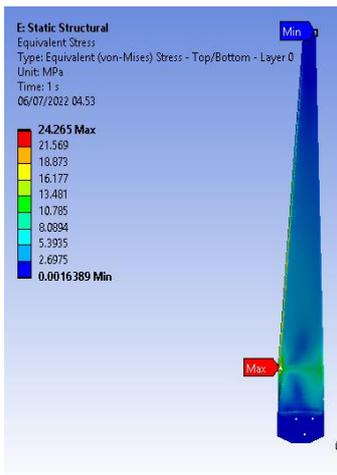
### 4.3.2 Tegangan von-Mises terhadap Variasi Sudut Orientasi Komposit

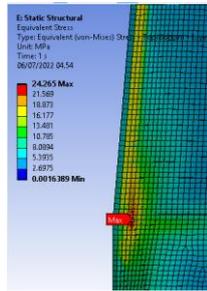
Tegangan von-Mises adalah tegangan statik yang dihitung berdasarkan pembebanan yang diberikan, yakni kecepatan angin 17 m/s. Tegangan ini merupakan nilai yang akan menjadi tolak ukur material, apakah akan mengalami kegagalan atau tidak. Hasil simulasi yang dilakukan ditunjukkan oleh gambar 4.8.



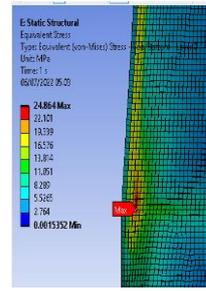
(a)

(b)

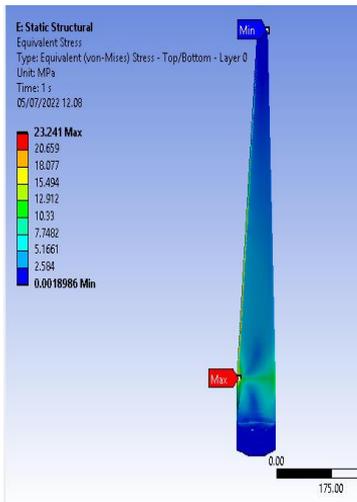




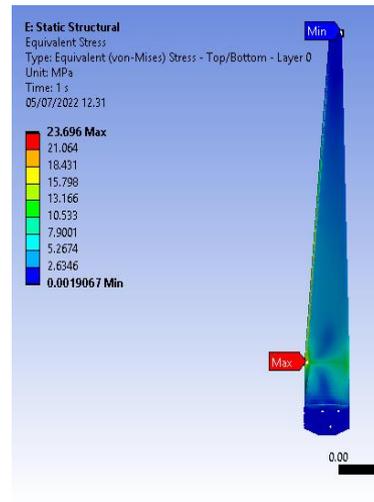
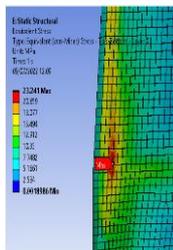
(c)



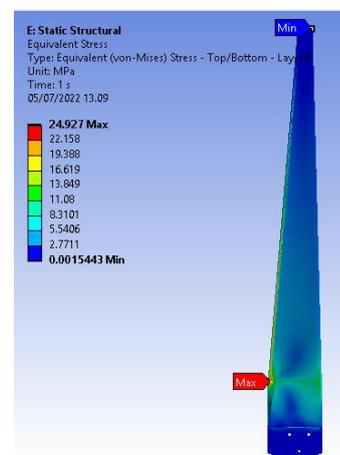
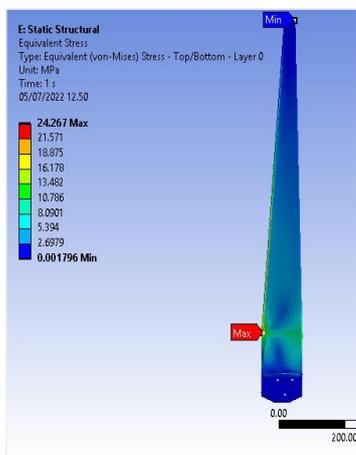
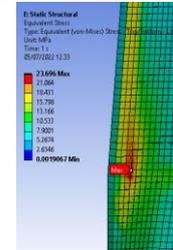
(d)

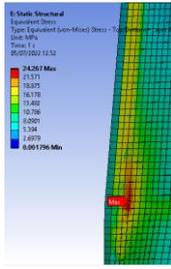


(e)

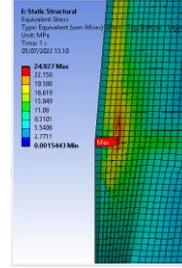


(f)





(g)

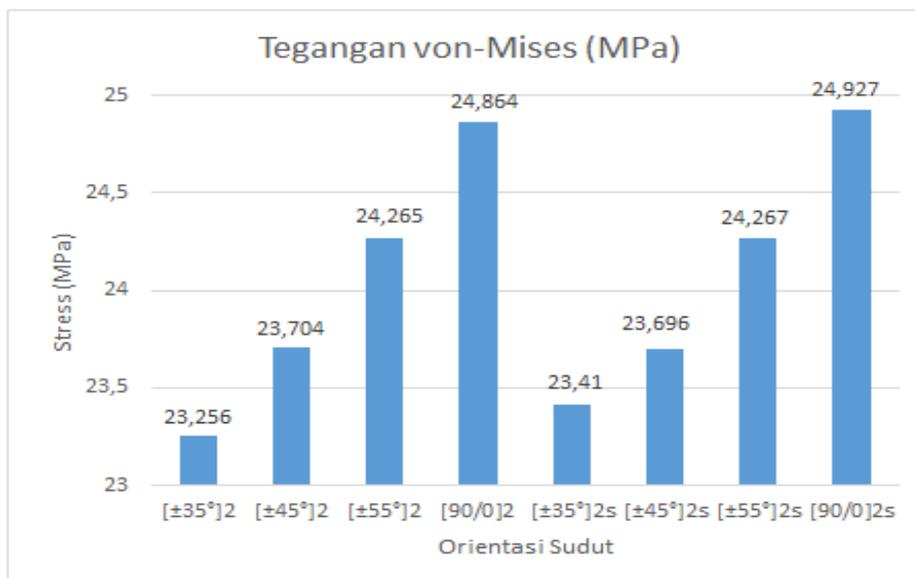


(h)

**Gambar 4. 12** Hasil Simulasi Nilai Tegangan von-Mises dengan Sudut Orientasi (a)  $[\pm 35^\circ]_2$  (b)  $[\pm 45^\circ]_2$  (c)  $[\pm 55^\circ]_2$  (d)  $[90^\circ/0^\circ]_2$  (e)  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  (f)  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  (g)  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  (h)  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$

**Tabel 4. 6** Hasil Simulasi Nilai Tegangan von-Mises pada Setiap Variasi Orientasi Sudut Komposit

Orientasi Sudut	Hasil Tegangan von-Mises Maksimum (MPa)
$[\pm 35^\circ]_2$	23,256
$[\pm 45^\circ]_2$	23,704
$[\pm 55^\circ]_2$	24,265
$[90^\circ/0^\circ]_2$	24,864
$[\pm 35^\circ]_{2s}$	23,41
$[\pm 45^\circ]_{2s}$	23,696
$[\pm 55^\circ]_{2s}$	24,267
$[90^\circ/0^\circ]_{2s}$	24,927



**Gambar 4. 13** Chart Hasil Simulasi Tegangan Von-Mises terhadap Variasi Sudut Orientasi Serat

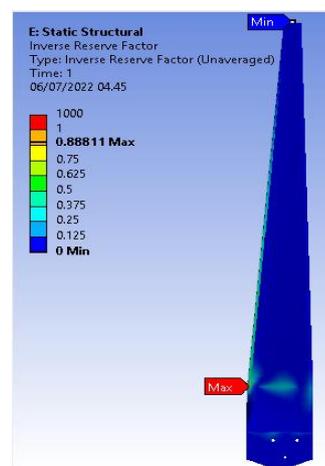
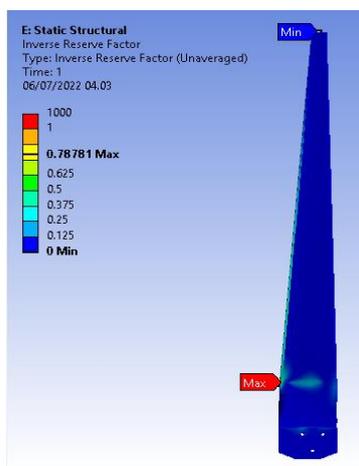
Berdasarkan data dari hasil simulasi pada bilah turbin angin dengan kecepatan angin 17 m/s yang ditunjukkan pada tabel 4.6 di atas, diketahui penggunaan serat sisal-epoxy pada bilah turbin angin dengan penyusunan material komposit untuk orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_2$  didapatkan nilai tegangan von-Mises yang dialami oleh bilah sebesar 23,256 MPa. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 45^\circ]_2$  didapatkan nilai tegangan von-Mises yang dialami oleh bilah sebesar 23,704 MPa.. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut  $[\pm 55^\circ]_2$  didapatkan nilai tegangan von-Mises yang dialami oleh bilah sebesar 24,265 MPa. Untuk orientasi kombinasi sudut  $[90^\circ/0^\circ]_2$  nilai tegangan von-Mises yang dialami oleh bilah sebesar 24,864 MPa.

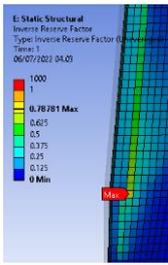
Sedangkan pada material komposit sisal-epoxy yang disusun dengan susunan simetrik, untuk orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  nilai tegangan von-Mises yang dialami oleh bilah sebesar 23,41 MPa. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai tegangan von-Mises yang dialami oleh bilah sebesar 23,696 MPa. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  nilai tegangan von-Mises yang dialami oleh bilah sebesar 24,267 MPa. Untuk kombinasi sudut  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai tegangan von-Mises yang dialami oleh bilah sebesar 24,927 MPa.

Berdasarkan nilai-nilai tersebut, nilai tegangan von-Mises tertinggi didapatkan pada variasi  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$  yakni sebesar 24,927 MPa dan nilai tegangan von-mises paling rendah didapat pada variasi  $[\pm 35^\circ]_2$  yakni sebesar 23,256 MPa. Terlihat dalam hasil simulasi, bahwa nilai tegangan von-Mises tertinggi pada semua variasi sudut orientasi komposit terletak pada bagian *pressure* bilah yang tepatnya berada di bagian transisi ujung pangkal bilah ke elemen-0. Titik ini merupakan lekukan yang terjadi akibat *thickness* pada pangkal bilah yang berbeda cukup signifikan terhadap profil *airfoil* SG-6043. Berdasarkan teori, bahwa karakterisasi komposit memanglah memiliki kekurangan yakni lemah terhadap lekukan. Hal ini lah yang menyebabkan adanya tegangan konsentrasi pada bagian tekukan tersebut.

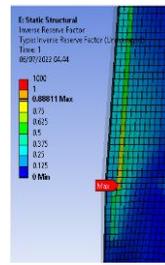
### 4.3.3 Nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu terhadap Variasi Sudut Orientasi Komposit

Nilai faktor kegagalan Tsai-Wu (*Inverse Reserve Factor*) merupakan nilai yang akan menjadi dasar dalam menentukan suatu material komposit mengalami kegagalan atau tidak. Kegagalan ini didefinisikan apabila nilai Tsai-Wu yang didapatkan lebih dari atau sama dengan 1. Dimana jika komposit mengalami kegagalan, maka hal ini mendefinisikan bahwa bilah turbin angin akan mengalami kegagalan pula pada kecepatan angin 17 m/s. Berikut ini gambar hasil simulasi pada setiap sudut orientasi.

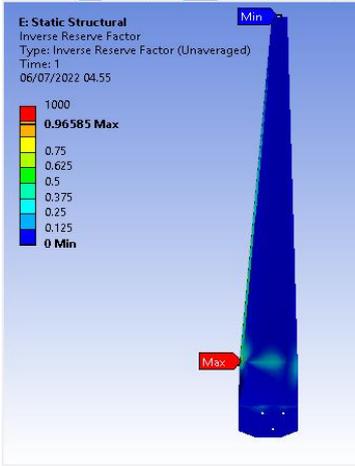




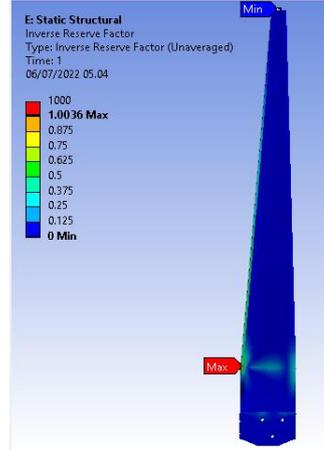
(a)



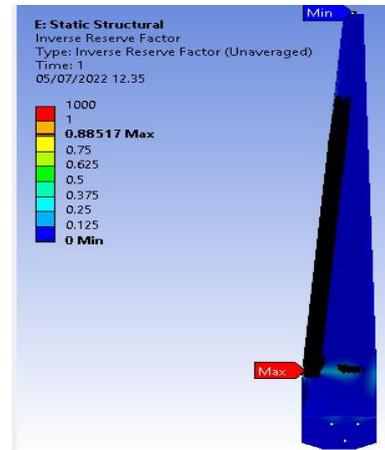
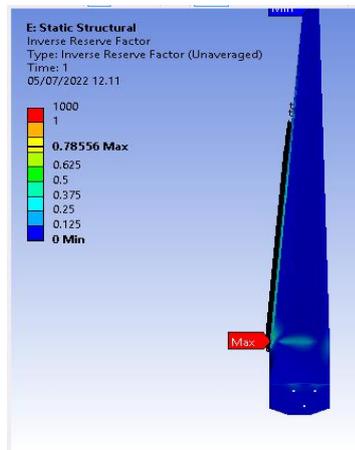
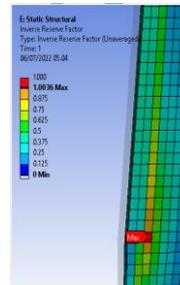
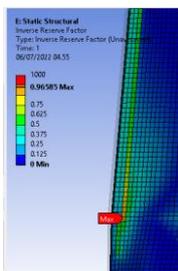
(b)

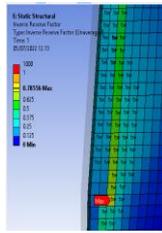


(c)

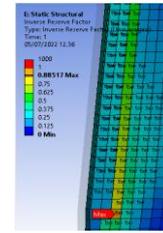


(d)

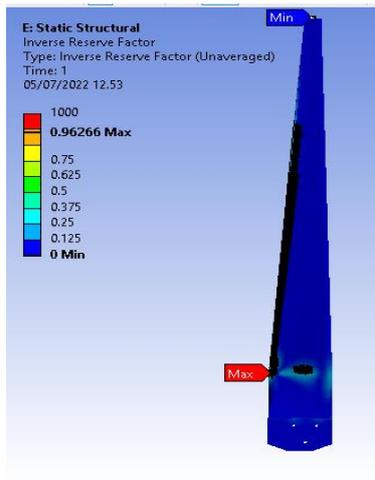




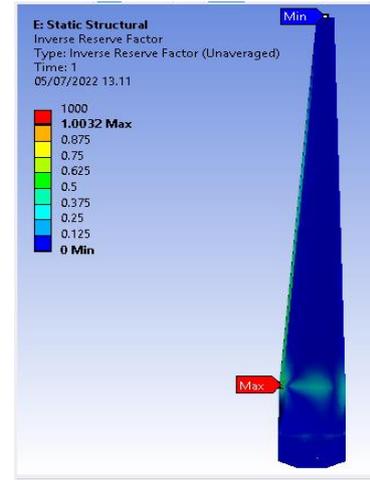
(e)



(f)



(g)



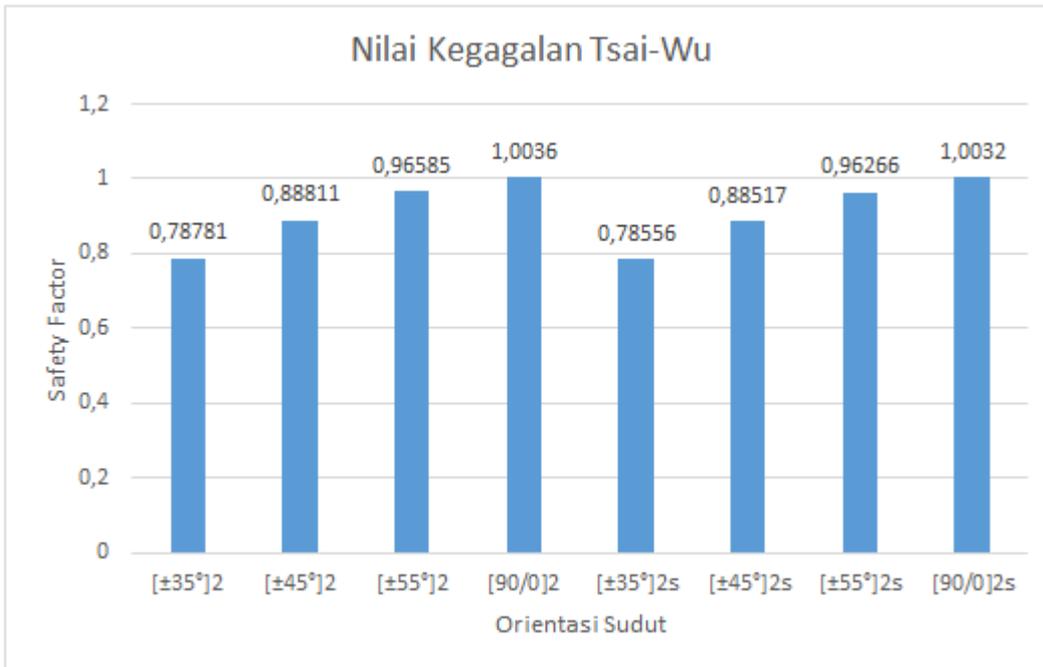
(h)

**Gambar 4. 14** Hasil Simulasi Nilai Kegagalan Tsai-Wu dengan Sudut Orientasi (a)  $[\pm 35^\circ]_2$  (b)  $[\pm 45^\circ]_2$  (c)  $[\pm 55^\circ]_2$  (d)  $[90^\circ/0^\circ]_2$  (e)  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  (f)  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  (g)  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  (h)  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$

**Tabel 4. 7** Hasil Simulasi Nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu pada Setiap Variasi Orientasi Sudut Komposit

Orientasi Sudut	Hasil Kegagalan Tsai-Wu Maksimum
$[\pm 35^\circ]_2$	0,78781
$[\pm 45^\circ]_2$	0,88811
$[\pm 55^\circ]_2$	0,96585
$[90^\circ/0^\circ]_2$	1,0036
$[\pm 35^\circ]_{2s}$	0,78556
$[\pm 45^\circ]_{2s}$	0,88517

$[\pm 55^\circ]_{2s}$	0,96266
$[90^\circ/0^\circ]_{2s}$	1,0032



**Gambar 4.15** Chart Hasil Simulasi Nilai Kegagalan Tsai-Wu terhadap Variasi Orientasi Sudut Serat

Berdasarkan data dari hasil simulasi pada bilah turbin angin dengan kecepatan angin 17 m/s yang ditunjukkan pada tabel 4.7 di atas, diketahui penggunaan serat sisal-epoxy pada bilah turbin angin dengan penyusunan material komposit untuk orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_2$  didapatkan nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu yang dialami oleh bilah sebesar 0,78781. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 45^\circ]_2$  didapatkan nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu yang dialami oleh bilah sebesar 0,88811. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut  $[\pm 55^\circ]_2$  nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu yang dialami oleh bilah sebesar 0,96585. Untuk orientasi kombinasi sudut  $[90^\circ/0^\circ]_2$  nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu yang dialami oleh bilah sebesar 0,99641.

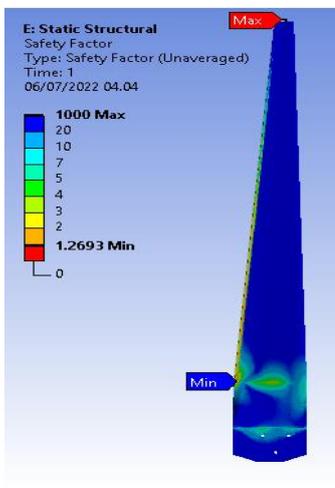
Sedangkan pada material komposit sisal-epoxy yang disusun dengan susunan simetrik, untuk orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu yang dialami oleh bilah sebesar 0,78556. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu yang dialami oleh bilah sebesar 0,88517. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu yang dialami oleh bilah sebesar 0,96266. Untuk kombinasi sudut  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai Faktor Kegagalan Tsai-Wu yang dialami oleh bilah sebesar 1,0032.

Berdasarkan nilai-nilai tersebut, komposit serat sisal-epoxy dengan sudut orientasi  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  memiliki nilai faktor kegagalan Tsai-Wu terkecil yakni sebesar 0,78781 dan sudut orientasi  $[90^\circ/0^\circ]_2$  memiliki nilai faktor kegagalan Tsai-Wu tertinggi yakni sebesar 1,0032. Oleh sebab itu, penyusunan sudut orientasi  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  merupakan susunan yang paling aman dan sudut orientasi  $[90^\circ/0^\circ]_2$  merupakan susunan yang paling tidak aman. Disamping itu, terlihat jika susunan serat yang simetrik lebih baik jika dibandingkan dengan susunan serat asimetrik. Hal ini dibuktikan dengan orientasi sudut serat yang sama namun disusun secara simetrik memiliki nilai kegagalan Tsai-Wu yang lebih kecil jika dibandingkan dengan susunan serat asimetrik. Berdasarkan hasil simulasi dapat diindikasikan pula bahwa susunan komposit serat sisal-epoxy dengan sudut orientasi  $[\pm 35^\circ]_2$ ,  $[\pm 45^\circ]_2$ ,  $[\pm 55^\circ]_2$ ,  $[\pm 35^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 45^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 55^\circ]_{2s}$ , dan

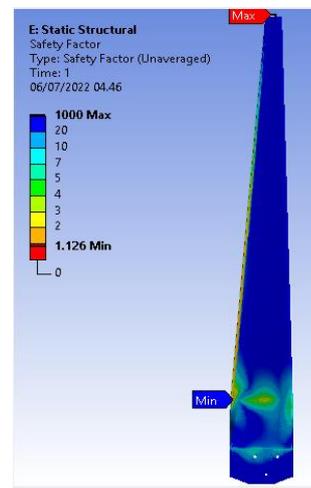
$[90^\circ/0^\circ]_2$  layak untuk diimplementasikan dikarenakan nilai dari faktor kegagalan Tsai-Wu di bawah dari 1. Sedangkan untuk sudut orientasi  $[90^\circ/0^\circ]_2$  tidak layak untuk diimplementasikan karena nilai dari faktor kegagalan Tsai-Wu di atas dari 1.

#### 4.3.4 Safety Factor terhadap Variasi Sudut Orientasi Komposit

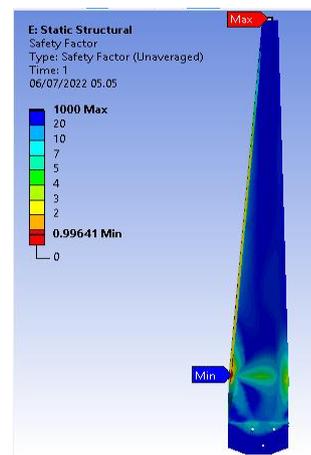
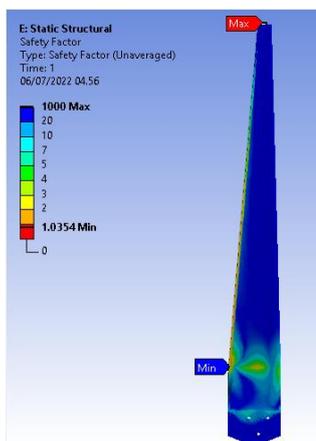
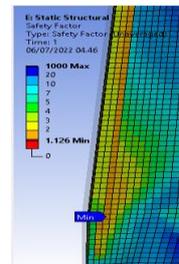
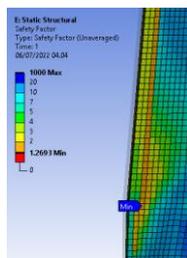
Nilai faktor keamanan (*Safety Factor*) merupakan nilai yang akan menjadi dasar dalam menentukan suatu material komposit layak untuk diimplementasikan pada bilah turbin angin atau tidak. Sebagaimana yang telah dijelaskan pada Bab II, bahwa nilai dari *safety factor* pada bilah turbin angin skala mikro harus setidaknya diatas atau sama dengan 1,25. Apabila nilai dari *safety factor* berada di bawah angka 1,25, maka bilah turbin angin akan mengalami kegagalan. Berikut ini merupakan gambar hasil simulasi nilai *safety factor* pada bilah turbin angin dengan kecepatan angin 17 m/s

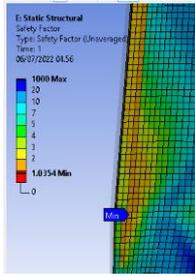


(a)

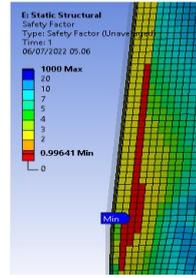


(b)

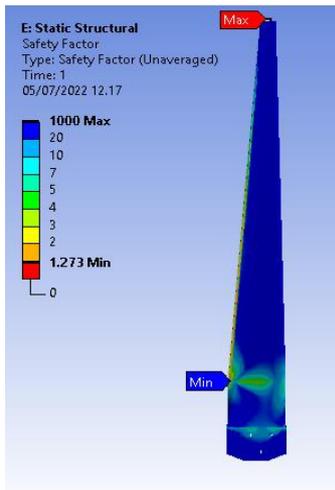




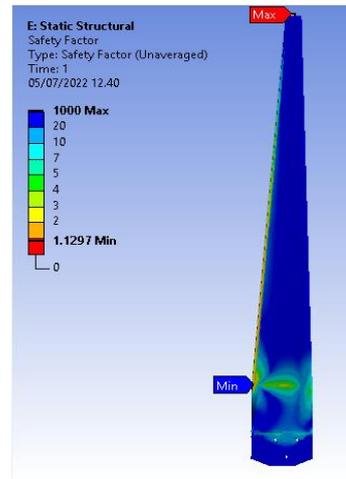
(c)



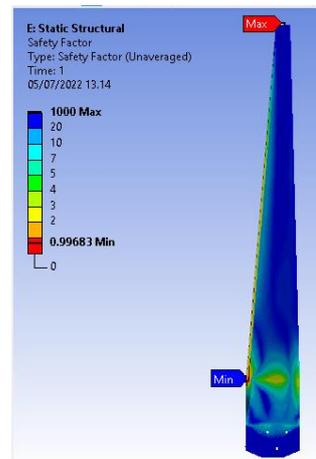
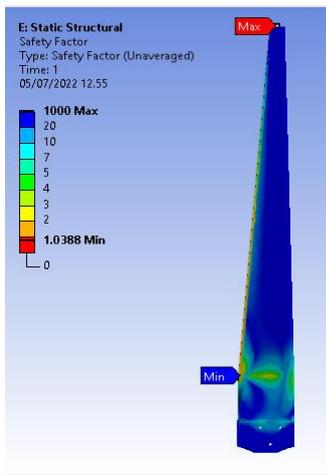
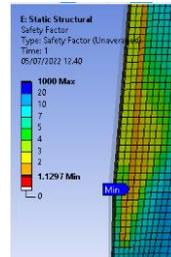
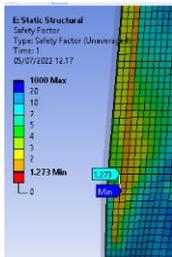
(d)

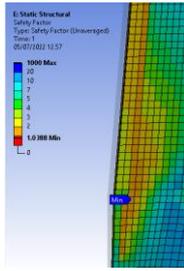


(e)

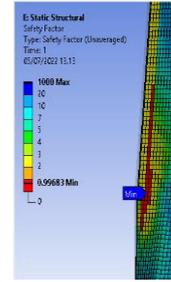


(f)





(g)

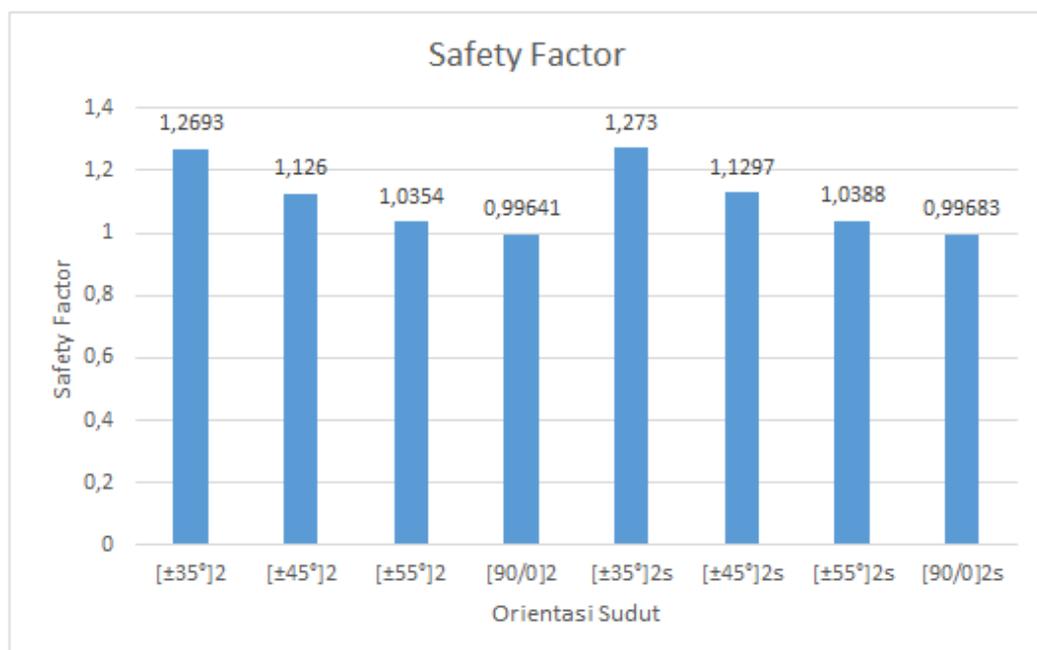


(h)

**Gambar 4. 16** Hasil Simulasi Nilai *Safety Factor* dengan Sudut Orientasi (a)  $[\pm 35^\circ]_2$  (b)  $[\pm 45^\circ]_2$  (c)  $[\pm 55^\circ]_2$  (d)  $[90^\circ/0^\circ]_2$  (e)  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  (f)  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  (g)  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  (h)  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$

**Tabel 4. 8** Hasil Simulasi Nilai *Safety Factor* pada Setiap Variasi Orientasi Sudut Komposit

Orientasi Sudut	Hasil <i>Safety Factor</i> Minimum
$[\pm 35^\circ]_2$	1,2693
$[\pm 45^\circ]_2$	1,126
$[\pm 55^\circ]_2$	1,0354
$[90^\circ/0^\circ]_2$	0,99641
$[\pm 35^\circ]_{2s}$	1,273
$[\pm 45^\circ]_{2s}$	1,1297
$[\pm 55^\circ]_{2s}$	1,0388
$[90^\circ/0^\circ]_{2s}$	0,99683



**Gambar 4. 17** Chart Hasil Simulasi Nilai *Safety Factor* terhadap Variasi Orientasi Sudut Serat

Berdasarkan data dari hasil simulasi pada bilah turbin angin dengan kecepatan angin 17 m/s yang ditunjukkan pada tabel 4.8 di atas, diketahui penggunaan serat sisal-epoxy pada bilah turbin angin dengan penyusunan material komposit untuk orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_2$  didapatkan nilai *safety factor* yang dialami oleh bilah sebesar 1,2693. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 45^\circ]_2$  didapatkan nilai *safety factor* yang dialami oleh bilah sebesar 1,126. Untuk penyusunan material komposit dengan orientasi sudut  $[\pm 55^\circ]_2$  didapatkan nilai *safety factor* yang dialami oleh bilah sebesar 1,0354. Untuk orientasi kombinasi sudut  $[90^\circ/0^\circ]_2$  didapatkan nilai *safety factor* yang dialami oleh bilah sebesar 0,99641.

Sedangkan pada material komposit sisal-epoxy yang disusun dengan susunan simetrik, untuk orientasi sudut  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai *safety factor* yang dialami oleh bilah sebesar 1,273. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 45^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai *safety factor* yang dialami oleh bilah sebesar 1,1297. Untuk kombinasi sudut  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai *safety factor* yang dialami oleh bilah sebesar 1,0388. Untuk kombinasi sudut  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$  didapatkan nilai *safety factor* yang dialami oleh bilah sebesar 0,99683.

Berdasarkan nilai-nilai tersebut, komposit serat sisal-epoxy dengan sudut orientasi  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  memiliki nilai *safety factor* tertinggi yakni sebesar 1,273 dan sudut orientasi  $[90^\circ/0^\circ]_2$  memiliki nilai *safety factor* terendah yakni sebesar 0,99641. Oleh sebab itu, penyusunan sudut orientasi  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  merupakan susunan yang paling aman dan sudut orientasi  $[90^\circ/0^\circ]_2$  merupakan susunan yang paling tidak aman. Disamping itu, terlihat jika susunan serat yang simetrik lebih baik jika dibandingkan dengan susunan serat asimetrik. Hal ini dibuktikan dengan orientasi sudut serat yang sama namun disusun secara simetrik memiliki nilai *safety factor* yang lebih besar jika dibandingkan dengan susunan serat asimetrik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diindikasikan bahwa susunan komposit serat sisal-epoxy dengan sudut orientasi  $[\pm 35^\circ]_2$ , dan  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  layak untuk diimplementasikan dikarenakan nilai dari *safety factor* berada di atas dari 1,25. Sedangkan untuk sudut orientasi  $[\pm 45^\circ]_2$ ,  $[\pm 45^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 55^\circ]_2$ ,  $[\pm 55^\circ]_{2s}$ ,  $[90^\circ/0^\circ]_2$ , dan  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$  tidak layak untuk diimplementasikan karena nilai dari *safety factor* berada di bawah dari 1,25.

#### 4.4 Pemetaan Distribusi Nilai Tegangan von-Mises pada Setiap Layer

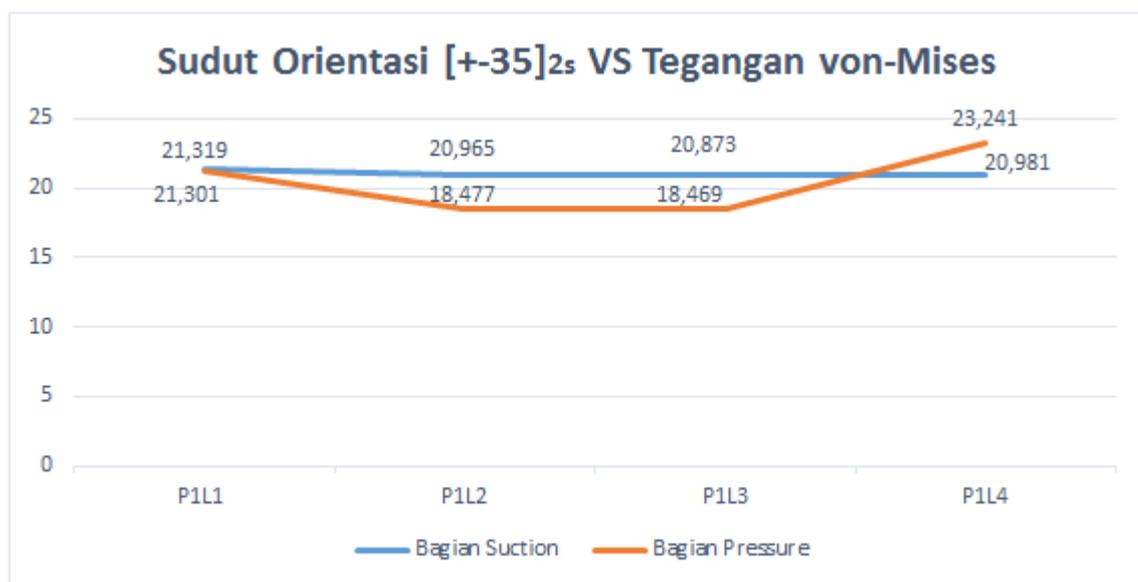
Distribusi nilai tegangan von-Mises pada setiap layer komposit perlu diketahui, untuk mengetahui nilai tegangan maksimum yang terbesar berada pada tumpukan layer ke berapa. Hasil simulasi yang didapatkan untuk nilai tegangan von-Mises pada seluruh sudut orientasi komposit adalah sebagai berikut.

**Tabel 4. 9** Hasil Distribusi Nilai Maksimum Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Semua Variasi Sudut Orientasi Komposit

Sudut Orientasi	Maximum von-Mises per Ply							
	Bagian Suction				Bagian Pressure			
	P1L1	P1L2	P1L3	P1L4	P1L1	P1L2	P1L3	P1L4
$[\pm 35^\circ]_2$	21,141	21,18	20,879	20,974	20,634	18,49	18,475	23,256
$[\pm 35^\circ]_{2s}$	21,168	21,169	20,894	20,958	20,738	18,468	18,47	23,704
$[\pm 45^\circ]_2$	21,189	21,139	20,916	20,939	20,929	18,457	18,475	24,265
$[\pm 45^\circ]_{2s}$	21,225	20,895	21,083	20,862	20,747	18,378	18,672	24,864
$[\pm 55^\circ]_2$	21,319	20,965	20,873	20,981	21,301	18,477	18,469	23,241

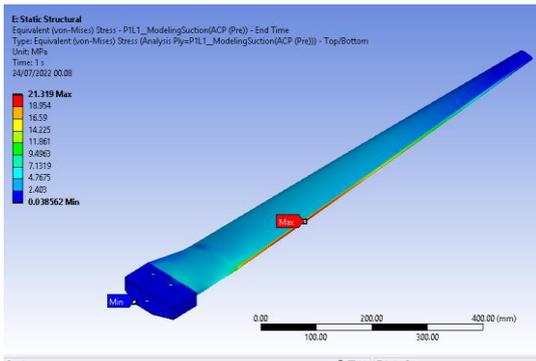
$[\pm 55^\circ]_{2s}$	21,313	20,986	20,888	20,967	21,577	18,475	18,465	23,696
$[0^\circ/90^\circ]_2$	21,282	21,011	20,912	20,949	21,832	18,483	18,472	24,267
$[0^\circ/90^\circ]_{2s}$	21,056	21,16	21,081	20,798	21,882	18,655	18,646	24,927

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil sebagaimana yang tertera pada tabel 4.9. Berdasarkan tabel tersebut, didapatkan tren untuk semua variasi orientasi sudut komposit memiliki kemiripan. Disamping itu, kemiripan juga terjadi dengan tegangan von-Mises maksimum terletak pada layer terluar pada bagian *pressure* bilah. Letak terjadinya tegangan von-Mises maksimum yakni pada titik lekukan sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya. Berikut ini hasil pemetaan distribusi nilai tegangan von-Mises pada setiap layer untuk sudut orientasi komposit  $[\pm 35^\circ]_{2s}$ .

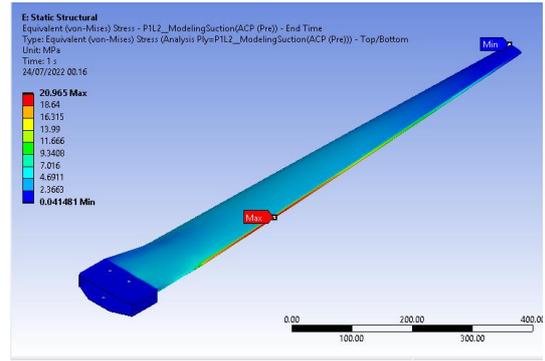


**Gambar 4. 18** Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 35^\circ]_{2s}$

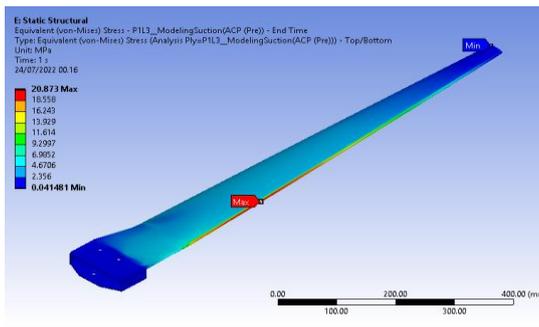
Pada sudut orientasi komposit  $[\pm 35^\circ]_{2s}$  memiliki tren yang stabil pada bagian *suction* bilah. Sedangkan pada bagian *pressure* bilah mengalami tren menurun lalu naik. Pada bagian *pressure*, tren mengalami penurunan pada layer pertama dengan besar tegangan ialah sebesar 21,301 MPa hingga pada layer ketiga dengan besar tegangan ialah sebesar 18,469. Kemudian, tren mengalami kenaikan yang cukup signifikan pada layer terluar dengan besar tegangan maksimum ialah sebesar 23,241 MPa. Untuk bagian *suction* memiliki tren yang stabil dan tidak memiliki perbedaan yang signifikan terhadap masing-masing layer. Adapun untuk distribusi tegangan von-Mises pada setiap layer adalah sebagai berikut.



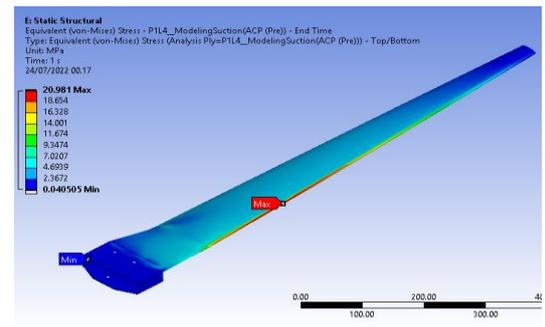
(a)



(b)

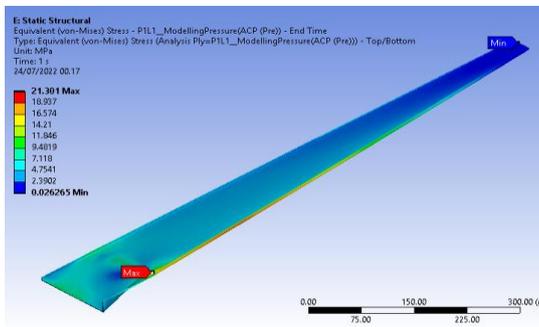


(c)

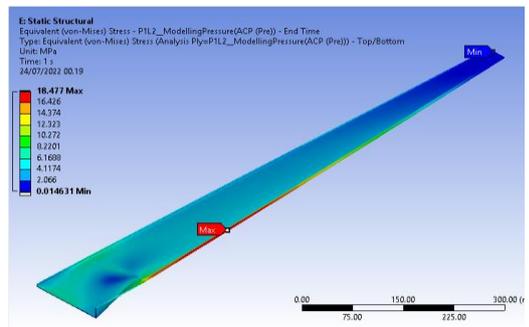


(d)

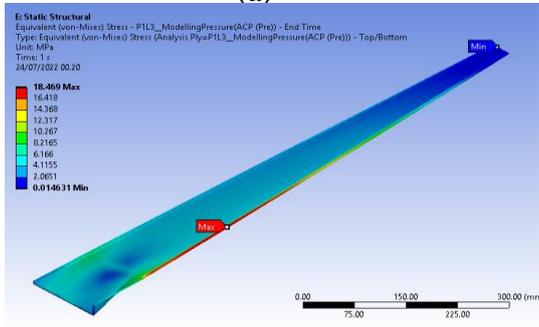
**Gambar 4. 19** Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer (a) 1 (b) 2 (c) 3 (d) 4 Bagian *Suction* Bilah untuk Variasi Sudut Orientasi  $[\pm 35^\circ]_2$



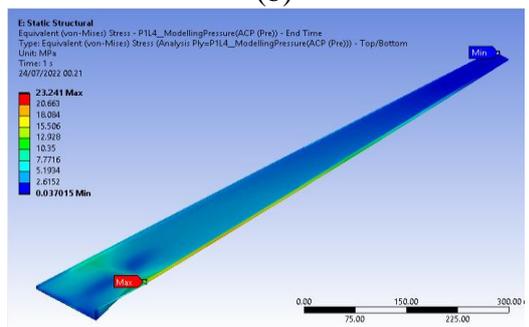
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4. 20** Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer (a) 1 (b) 2 (c) 3 (d) 4 Bagian *Pressure* Bilah untuk Variasi Sudut Orientasi  $[\pm 35^\circ]_2$

#### 4.5 Pemetaan Distribusi Nilai Safety Factor pada Setiap Layer

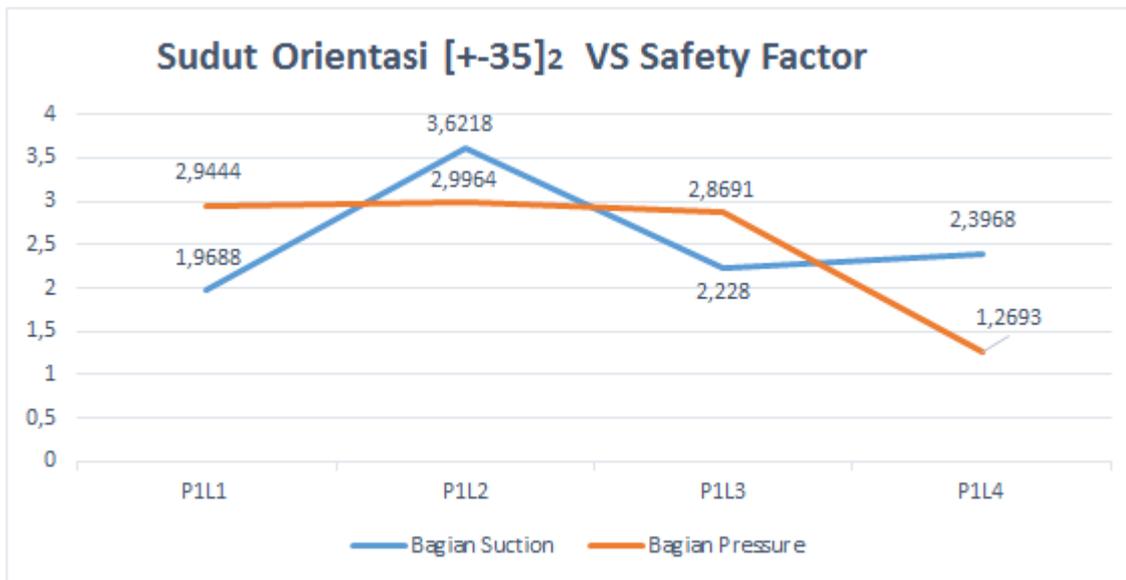
Distribusi nilai safety factor pada setiap layer komposit perlu diketahui, untuk mengetahui tingkat keamanan komposit pada masing-masing layer serta untuk mengetahui nilai safety factor paling minimum terletak pada layer ke berapa. Hasil simulasi dari pemetaan distribusi nilai safety factor pada setiap layer memiliki tren yang berbeda-beda untuk masing-masing variasi sudut orientasi komposit. Perbedaan ini tentunya dikarenakan karakterisasi dari masing-masing sudut orientasi dan tumpukan komposit memiliki respon yang berbeda-beda terhadap pembebanan yang diberikan. Adapun nilai dari safety factor pada setiap layer untuk semua variasi sudut orientasi komposit tertera pada tabel 4.10.

**Tabel 4. 10** Hasil Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Semua Variasi Sudut Orientasi Komposit

Sudut Orientasi	Minimum Safety Factor per Ply							
	Bagian Suction				Bagian Pressure			
	P1L1	P1L2	P1L3	P1L4	P1L1	P1L2	P1L3	P1L4
$[\pm 35^\circ]_2$	1,9688	3,6218	2,228	2,3968	2,9444	2,9964	2,8691	1,2693
$[\pm 35^\circ]_{2s}$	1,8075	3,0614	2,0096	2,0397	2,6467	2,6293	2,556	1,126
$[\pm 45^\circ]_2$	1,7191	2,6416	1,872	1,8126	2,34	2,386	2,2228	1,0354
$[\pm 45^\circ]_{2s}$	3,4114	1,8791	3,8693	1,6867	3,339	2,065	3,4903	0,99641
$[\pm 55^\circ]_2$	3,6544	2,0971	2,227	2,4012	3,1204	3,3143	2,8771	1,273
$[\pm 55^\circ]_{2s}$	3,0733	1,908	2,0088	2,0423	2,7316	2,8118	2,5675	1,1297
$[0^\circ/90^\circ]_2$	2,6155	1,7956	1,8713	1,8139	2,4355	2,4657	2,2325	1,0388
$[0^\circ/90^\circ]_{2s}$	1,8709	3,6415	3,868	1,6901	2,0683	4,9094	3,4731	0,99683

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan 4 jenis tren grafik yang berbeda-beda sebagaimana yang tertera pada tabel 4.10. Tren pertama yang sama adalah untuk orientasi sudut komposit  $[\pm 35^\circ]_2$ ,  $[\pm 45^\circ]_2$ , dan  $[\pm 55^\circ]_2$ . Tren kedua yang sama adalah untuk orientasi sudut komposit  $[\pm 35^\circ]_{2s}$ ,  $[\pm 45^\circ]_{2s}$ , dan  $[\pm 55^\circ]_{2s}$  sedangkan tren ketiga adalah untuk orientasi sudut komposit  $[90^\circ/0^\circ]_2$  serta tren keempat adalah untuk orientasi sudut komposit  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$ . Walaupun tren dari masing-masing sudut orientasi komposit memiliki perbedaan, akan tetapi nilai minimum dari safety factor didapatkan pada titik dan layer yang sama, yakni layer terluar bagian *pressure* bilah dan terletak pada titik tekukan yang dimana memiliki nilai tegangan terbesar. Berikut ini merupakan hasil grafik yang didapatkan dari simulasi untuk masing-masing tren terhadap sudut orientasi sudut komposit.

#### 4.5.1 Tren Pertama untuk Sudut Orientasi $[\pm 35^\circ]_2$ , $[\pm 45^\circ]_2$ , dan $[\pm 55^\circ]_2$

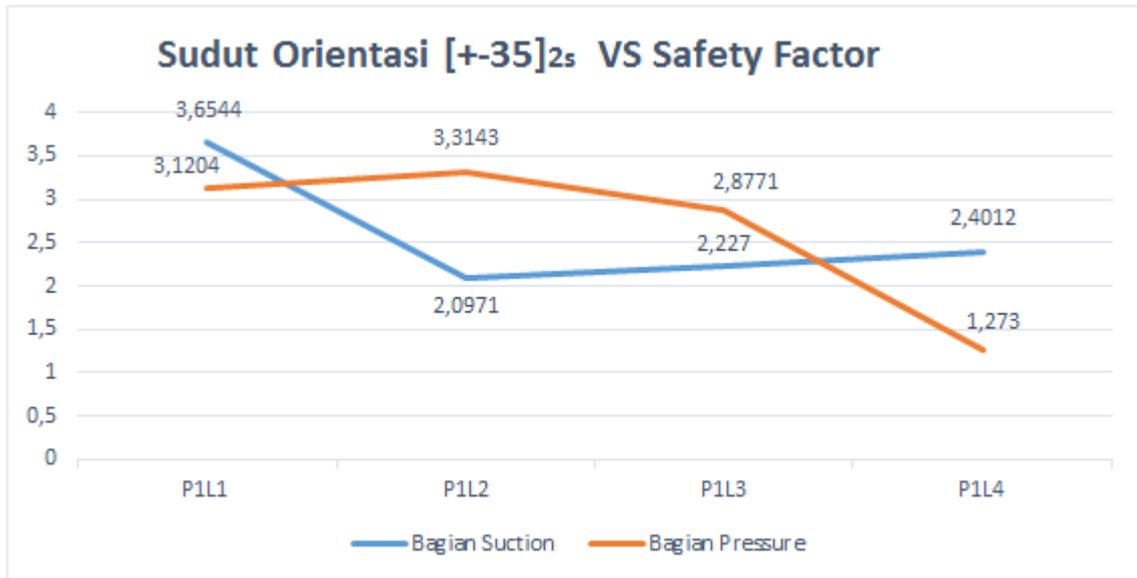


**Gambar 4. 21** Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 35^\circ]_2$

Tren grafik untuk nilai safety factor setiap layer pada bagian *suction* mengalami kenaikan antara layer 1 dan layer 2, hal itu terlihat dimana nilai safety factor adalah 1,968 dan 3,621. Kemudian nilai safety factor akan mengalami tren menurun antara layer 2 dan layer 3 yang dimana nilai safety factor dari layer 3 adalah 2,228. Kemudian antara layer 3 dan layer 4 mengalami kenaikan, namun tidak signifikan dengan nilai safety factor untuk layer 4 adalah 2,3968. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, dapat diindikasikan bahwa pada bagian *suction* bilah tidak mengalami kegagalan statis.

Selanjutnya pada bagian *pressure*, bilah mengalami tren yang cukup stabil antara layer 1,2, dan 3. Kemudian bilah mengalami penurunan nilai antara layer 3 dan layer 4, dimana layer 4 memiliki nilai safety factor yakni sebesar 1,2693. Pada layer 4 ini lah merupakan titik kritikal tegangan maksimum yang terjadi pada bilah yang terletak pada bagian tekukan bilah. Layer 4 ini sendiri merupakan layer terluar dari bilah turbin sehingga tentunya bilah akan mengalami tegangan terbesar pada layer ini. Berdasarkan nilai tersebut pula, bilah pada bagian *pressure* diindikasikan tidak mengalami kegagalan statis karena nilai safety factor berada di atas rentang tingkat keamanan bilah untuk skala mikro yang bernilai 1,25.

#### 4.5.2 Tren Kedua untuk Sudut Orientasi $[\pm 35^\circ]_{2s}$ , $[\pm 45^\circ]_{2s}$ , dan $[\pm 55^\circ]_{2s}$

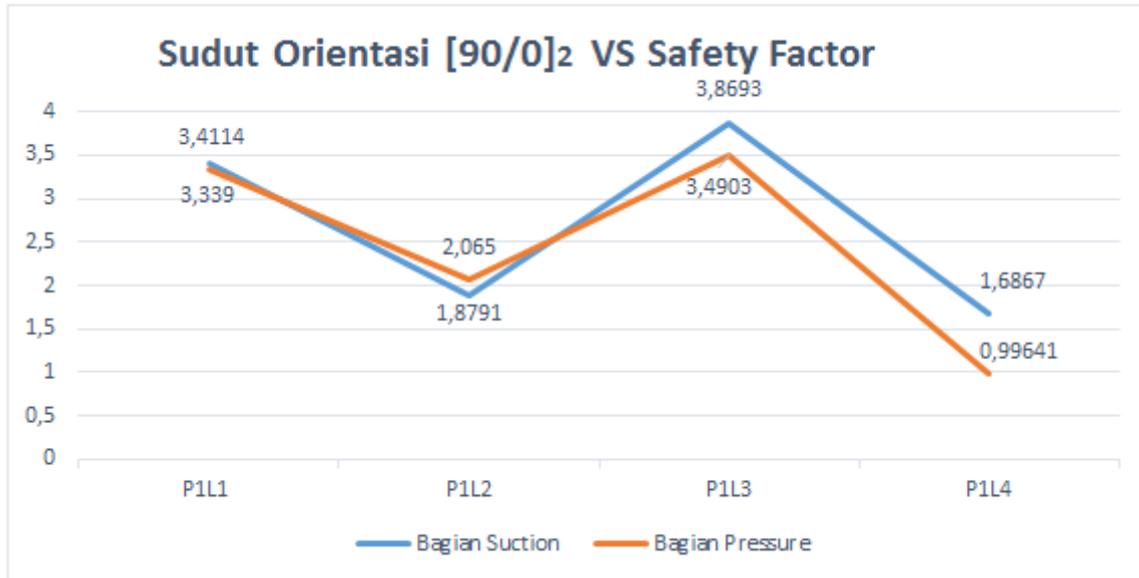


**Gambar 4. 22** Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 35^\circ]_{2s}$

Tren grafik untuk nilai safety factor setiap layer pada bagian *suction* mengalami penurunan antara layer 1 dan layer 2 sebagaimana yang terlihat pada nilai kedua layer tersebut adalah 3,6544 dan 2,0971. Kemudian nilai safety factor akan mengalami tren kenaikan berturut-turut pada layer 3 dan layer 4 dengan nilai safety factor yakni 2,227 dan 2,4012. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, dapat diindikasikan bahwa pada bagian *suction* bilah tidak mengalami kegagalan statis.

Selanjutnya pada bagian *pressure*, bilah mengalami tren kenaikan antara layer 1 dan layer 2 yakni dengan nilai sebesar 3,1204 dan 3,3143. Kemudian bilah mengalami penurunan nilai antara layer 2 dan layer 3, dimana layer 3 memiliki nilai safety factor yakni sebesar 2,8771. Kemudian pada layer 4 ini merupakan titik kritikal tegangan maksimum yang terjadi pada bilah yang terletak pada bagian tekukan bilah yakni memiliki nilai safety factor sebesar 1,273. Layer 4 ini sendiri merupakan layer terluar dari bilah turbin sehingga tentunya bilah akan mengalami tegangan terbesar pada layer ini. Berdasarkan nilai tersebut pula, bilah pada bagian *pressure* diindikasikan tidak mengalami kegagalan statis.

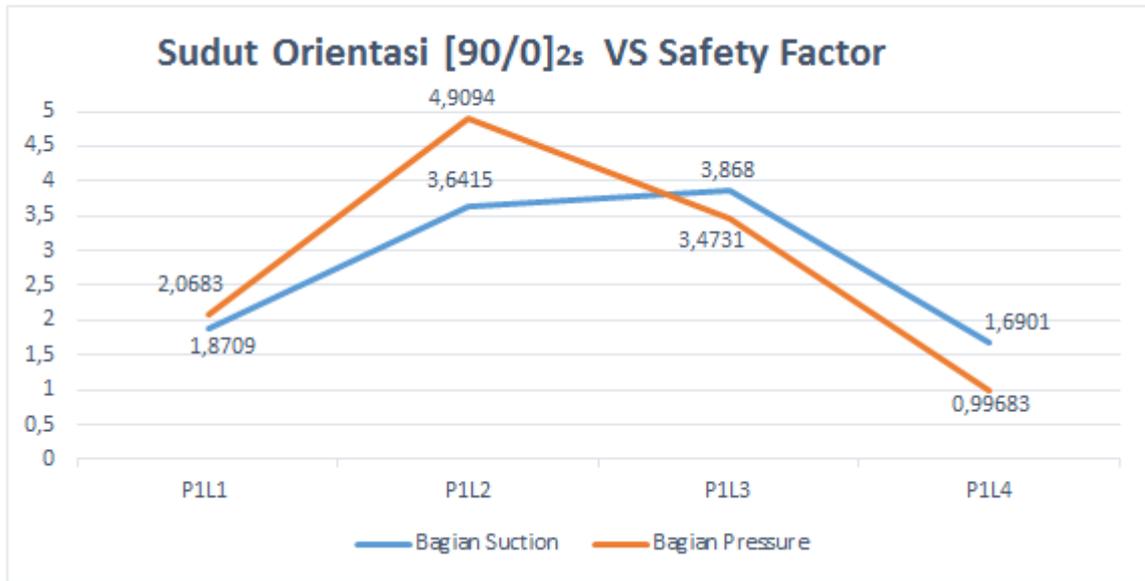
### 4.5.3 Tren Ketiga untuk Sudut Orientasi $[90^\circ/0^\circ]_2$



**Gambar 4. 23** Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[90^\circ/0^\circ]_2$

Tren grafik untuk nilai safety factor setiap layer pada bagian *suction* dan *pressure* memiliki tren yang mirip, yaitu nilai safety factor mengalami penurunan antara layer 1 dan layer 2, selanjutnya mengalami kenaikan antara layer 2 dan layer 3, kemudian mengalami penurunan kembali antara layer 3 dan layer 4. Pada bagian *suction*, untuk layer 1, 2, 3, dan 4 nilai dari safety factor masing-masing layer secara berturut-turut adalah 3,4114 ; 1,8791 ; 3,8693 ; dan 1,6867. Sedangkan pada bagian *pressure*, untuk layer 1,2,3, dan 4 nilai dari safety factor masing-masing 3,339 ; 1,8791 ; 3,4903 ; dan 0,99641. Berdasarkan nilai-nilai safety factor tersebut, maka diindikasikan bahwa bagian *suction* tidak akan mengalami kegagalan statis. Namun, pada bagian *pressure* diindikasikan akan mengalami kegagalan pada layer ke 4 karena nilai safety factor berada di bawah rentang batas aman.

#### 4.5.4 Tren Keempat untuk Sudut Orientasi $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$



**Gambar 4. 24** Distribusi Nilai Minimum Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[90^\circ/0^\circ]_{2s}$

Tren grafik untuk nilai safety factor setiap layer pada bagian *suction* mengalami kenaikan dari layer 1 hingga layer 3, sebagaimana yang terlihat pada nilai ketiga layer tersebut secara berturut-turut adalah 1,8709 ; 3,6415 ; dan 3,868. Kemudian nilai safety factor akan mengalami tren penurunan antara layer 3 dan layer 4 dengan nilai safety factor pada layer 4 adalah 1,6901. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, dapat diindikasikan bahwa pada bagian *suction* bilah tidak mengalami kegagalan statis.

Selanjutnya pada bagian *pressure*, nilai safety factor pada setiap layer mengalami kenaikan antara layer 1 dan layer 2 sebagaimana yang terlihat pada nilai kedua layer tersebut adalah 2,0683 dan 4,9094. Kemudian nilai safety factor akan mengalami tren penurunan dari layer 2 hingga layer 4 dengan nilai safety factor pada layer 3 dan layer 4 secara berturut-turut yakni 3,4731 dan 0,99683. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, dapat diindikasikan bahwa pada bagian *pressure* bilah akan mengalami kegagalan pada layer ke 4 dikarenakan nilai dari safety factor berada di bawah rentang batas aman.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Bilah turbin angin TSD-500 tipe *taper* dengan profil airfoil SG-6043 dengan 1 meter telah dirancang. Didapatkan bahwa nilai dari lebar *chord* maksimal terletak pada elemen ke-0 bilah yakni sebesar 12 mm dan lebar *chord* minimum terletak pada elemen ke-10 bilah yakni sebesar 3 mm. Kemudian, nilai dari sudut *twist* bilah terbesar yaitu terletak pada elemen ke-0 bilah yakni sebesar  $7,11^\circ$  dan sudut *twist* minimum terletak pada elemen ke-10 bilah yakni sebesar  $0,1^\circ$ . Adapun bilah turbin yang telah dirancang ini memiliki performa yang baik diantaranya memiliki torsi optimal sebesar 13,7 Nm pada saat kecepatan putar 430 rpm, memiliki daya output optimal sebesar 656,6 watt pada saat kecepatan putar 473, dan mampu menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 47 % pada saat TSR 5,5.
2. Dalam pembuatan bilah turbin angin dengan menggunakan komposit sisal-epoksi, didapatkan bahwa orientasi sudut terbaik dari variasi orientasi sudut yang telah ditentukan adalah sudut  $[\pm 35]_{2s}$ . Hal ini dikarenakan nilai dari deformasi yang terjadi pada orientasi sudut  $[\pm 35]_{2s}$  merupakan nilai deformasi yang paling kecil jika dibandingkan orientasi sudut lainnya, yang berarti orientasi sudut ini memiliki kekakuan yang paling tinggi jika dibandingkan dengan orientasi sudut lainnya. Kemudian, nilai dari safety factor terbaik didapatkan pada orientasi sudut ini yakni sebesar 1,27. Nilai safety factor ini menjadikan orientasi sudut  $[\pm 35]_{2s}$  dapat diimplementasikan karena memiliki nilai safety factor yang berada di atas rentang batas aman. Namun nilai dari tegangan von-Mises yang terjadi pada orientasi sudut ini bukanlah tegangan von-Mises yang paling rendah jika dibandingkan dengan sudut orientasi lain, melainkan terendah ke-2. Walaupun sudut ini memiliki tegangan von-Mises ke-2, sudut ini memiliki karakterisasi komposit yang terbaik untuk pembebanan yang terjadi pada bilah. Hal ini dibuktikan dengan nilai safety factor terbesar dimiliki oleh variasi sudut orientasi ini.

### 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian ini saran yang dapat dilakukan atau diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Perancangan bilah turbin dapat dilakukan dengan menggunakan profil *airfoil* yang lain atau dapat menggabungkan beberapa profil *airfoil* dalam proses perancangan.
2. Perancangan bilah turbin dapat dilakukan dengan menggunakan material *laminated hybrid composite* yang terdiri atas komposit yang berbeda beda. Baik campuran antara komposit sintetis dan natural ataupun antara komposit natural yang berbeda.
3. Perancangan dilakukan dengan ketebalan komposit yang berbeda pada setiap elemen dengan mempertimbangkan sisi ekonomis dan aerodinamis.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR PUSTAKA

- Acosta-Calderon, S., Gordillo-Silva, P., & Garcia-Troncoso, N. (2021). Comparative Evaluation of Sisal and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Properties.
- Alkhabbaz, A., Yang, H.-S., Weerakoon, A. S., & Lee, Y.-H. (2021). A novel linearization approach of chord and twist angle distribution. *Renewable Energy* 178, 1398-1420.
- Alkhabbaz, A., Yang, H.-S., Weraakoon, A. S., & Lee, Y.-H. (2021). A novel linearization approach of chord and twist angle distribution. *Renewable Energy* 178, 1398-1420.
- AnsysR2. (2020).
- Avraham, T. (2020, May 4). Diambil kembali dari Turbulence Modeling –Near Wall Treatment: [Cfdisrael.blog](http://Cfdisrael.blog)
- Bangga, G. (2018). *Comparison of Blade Element Method and CFD*, 73.
- Bangga, G. (2018). Comparison of Blade Element Method and CFD. *Fluids*, 3(4), 73.
- Basuki, T., & Verona, L. (2017). Manfaat Serat Sisal (*Agave sisalana* L.) dan Bambu (*Bambusoideae*) untuk Memenuhi Kebutuhan Masyarakat Modern.
- Chawla, K. K. (1987). *Composite Material : Science and Engineering-Springer Verlag*. CRC Press.
- Dahlan, B. (2016). Rancang Bangun Baling-Baling Kincir Angin Menggunakan NACA 4412 dan 4415 dari Bahan Kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan Pinus (*Pinus merkusii*).
- Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials Second Edition*. New York: Oxford University Press.
- Denk, K. (2007). Development of A Pressure-Based Solver for Both Incompressible and Compressible Flows.
- Dirgantini, D. (2021). Simulasi Kekuatan Struktur Kayu Pinus Terhadap Pembebanan pada Turbin Angin Sumbu Horizontal Skala Mikro.
- Engineering, Q. (2022). *Quadco Engineering*. Diambil kembali dari [www.quadcoengineering.com](http://www.quadcoengineering.com)
- Erhunmwun, I., & Ikponmwosa, U. (2017). Review on Finite Element Method.
- Fachri, M., & Hendrayana, H. (2017). Analisa Potensi Energi Angin dengan Distribusi Weibull untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Banda Aceh.
- Fajrin, J. (2016). *Mechanical Properties of Natural Fiber Composite Made of Indonesia Grown Sisal*.
- Gemert, D. V., L.Czarnecki, P.Lukowski, & E.Knapen. (2004). Cement Concrete and Concrete-Polymer Composites : Two Merging Worlds. *A Report from 11th ICPIIC Congress in Berlin*.

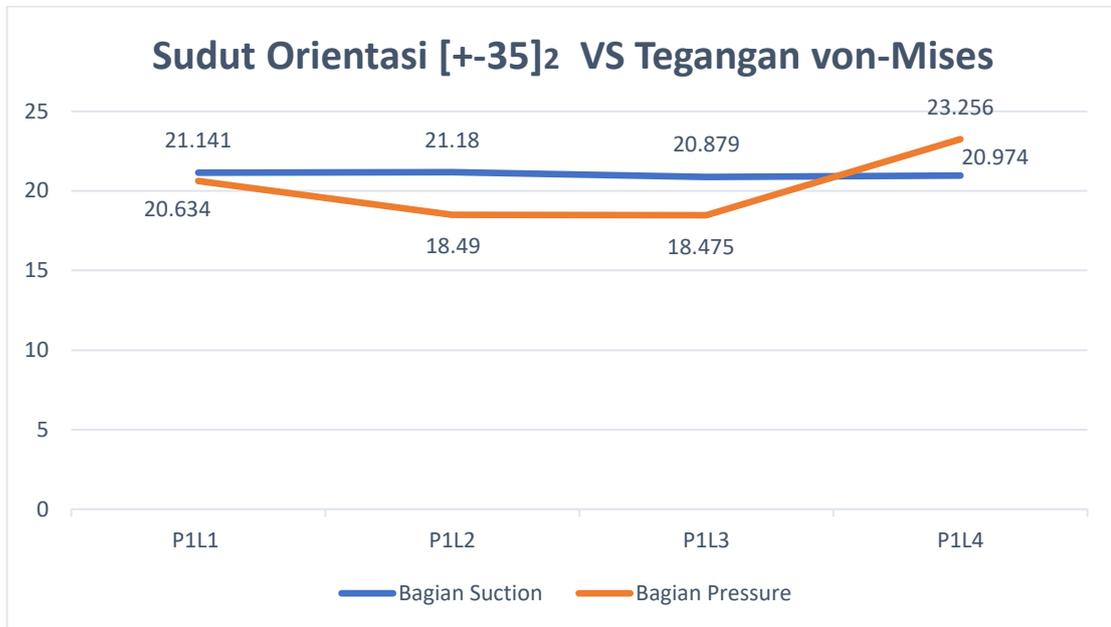
- Gibran, F. R., Saffire, M., & Warits, A. D. (2016). Design of NACA 4415 Taperless Twistless Wind Turbine Blade Using Twist Optimizaation for Indonesia Wind Characteristics. *Wind Energy Research Group Tropical Renewable Energy Centre Faculty of Engineering University of Indonesia, Indonesia*.
- Halim, M. A., Mohd, N. A., Nasir, M. M., & Dahalan, M. (2018). The Evaluation of K-Epsilon and K-Omega Turbulence Models in Modelling Flows and Performance of S-Shaped Diffuser.
- Handoko, A. D. (2019). Pengembangan Bilah Turbin Angin Jenis Semi-Inversed Taper untuk Angin Berkcepatan Rendah.
- Hidayat, A. (2019). Simulasi Turbin Angin Jenis Crossflow Dengan Variasi Jumlah Sudu dan Sudut Kemiringan Sudu Terhadap Kinerja Turbin.
- Inayah, Z. N. (2020). *Dasar-Dasar Perancangan Bilah LBN*.
- Inayah, Z. N. (2020). Modul Pengenalan Turbin Angin Skala Mikro Lentera Bumi Nusantara.
- Ingram, G. (2011). Wind Turbine Blade Analysis Using The Blade Element Momentum Method. *Version 1.1*.
- J. Ledoux, S. &. (2021). SIAM Journal on Applied Mathematics. *Analysis of the Blade Element Momentum Theory*, 2596-2621.
- Kumar, M. (2017). *Composite Structures Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing Vol,59*. CRC Press.
- Kusumastuti, A. (2009). Aplikasi Serat Sisal Sebagai Komposit Polimer.
- Ledoux, J., Riffo, S., & Julien, S. (2021). Analysis of the Blade Element Momentum Theory. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2596-2621.
- Li, Y., & Mai, Y.-W. (2000). Sisal Fibre and Its Composites. *A Review of Recent Developments*, 2037-2055.
- Logan, D. L. (2002). *A First Course in the Finite Element Method*. Pasific Groove: Thomson Learning Inc.
- MatWeb. (2022). *Mat Web*. Diambil kembali dari African Mahogany Wood Material Property Data:  
<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8188e7e1f11b4deb9fd67fe18d83e272>
- Moriarty, P. J. (2008). Safety-Factor Calibration for Wind Turbine Extreme Loads.
- Musyafa, A. (2012). Rancang Bangun Kontrol Logika Fuzzy Pada Sudut Angguk Turbin Angin Untuk Optimisasi Daya Listrik di Ladang Angin Jawa Timur - Indonesia.
- Nongdhar, D., & Goswami, B. (2018). Design of Micro Wind Turbine for Low Wind Speed Areas. *A Review*.
- P3TKEBT, E. (2021, Januari 30). *Energi Angin*. Diambil kembali dari Potensi Energi Angin Indonesia 2020: P3TKEBT.esdm.go.id

- Piggott, H. (2011). *Wind Power Workshop Building Your Own Wind Turbine*. Powys: Centre for Alternative Technology Publications.
- Roul, R., & Kumar, A. (2020). Fluid-Structure Interaction of Wind Turbine Blade Using Four Different Materials. *Numerical Investigation*.
- Rouway, M. (2020). Prediction of Mechanical Performance of Natural Fibers Polypropylene Composites. *a Comparison Study*.
- Sapto, A. D., & Rumakso, H. P. (2021). Uji Coba Performa Bentuk Airfoil Menggunakan Software Qblade Terhadap Turbin Angin Tipe Sumbu Horizontal. *Jurnal Teknik Mesin : Vol. 10, No. 1*.
- Schwartz, M. M. (1984). *Composite Materials Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Setyawan, R. E. (2018). Analisis dan Pemodelan Savonius Vertical Axis Wind Turbine dengan Variasi Blade Terhadap Aliran Udara dengan Metode CFD (Computational Fluid Dynamics).
- Towo, A. N., & Ansell, M. P. (2008). Fatigue of Sisal Fibre Reinforced Composites . *Constant-Life Diagrams and Hysteresis Loop Capture*.
- Voyiadjis, G., & Kattan, P. (t.thn.). *Mechanics of Composite Materials with MATLAB*. Springer.
- Wang, L., Quant, R., & Kolios, A. (2015). Fluid Structure Interaction Modelling of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades Based on CFD and FEA.
- Wiratama, C. (2021, May 2). *Aeroengineering.co.id*. Diambil kembali dari Perbedaan Model Turbulensi K-Epsilon, K-Omega, dan K-Omega SST: <https://www.aeroengineering.co.id/2021/05/perbedaan-model-turbulen-k-epsilon-k-omega-dan-k-omega-sst/>
- Xia, B., & Sun, D.-W. (2002). Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the Food Industry. *A Review*.

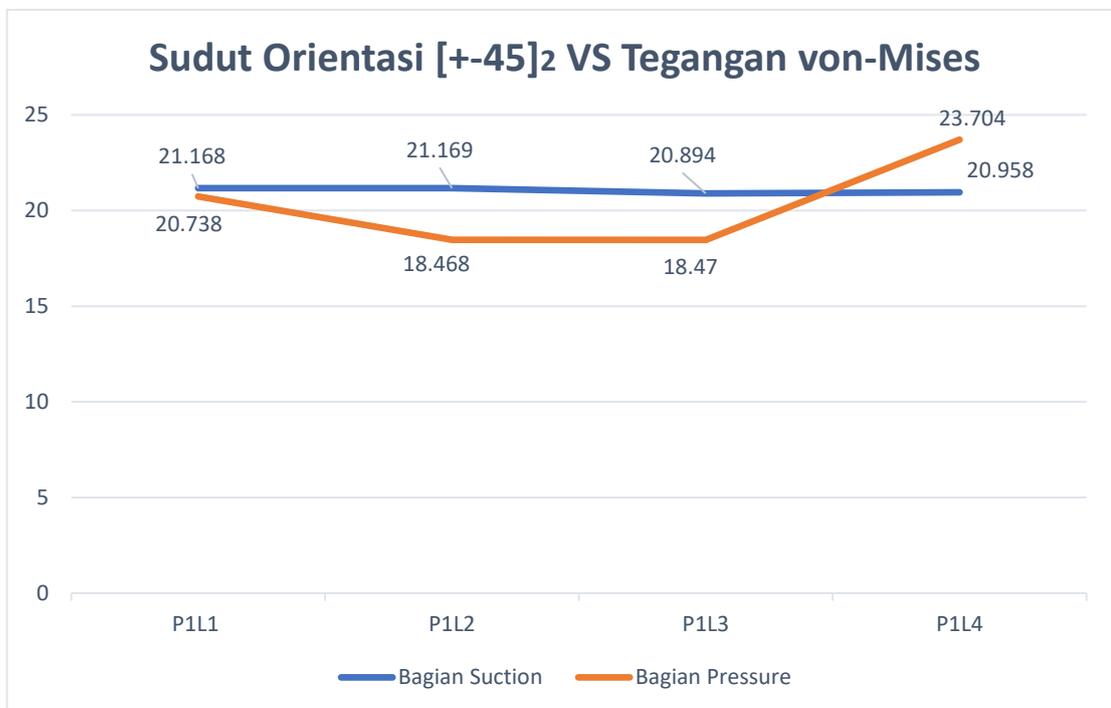
*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## LAMPIRAN

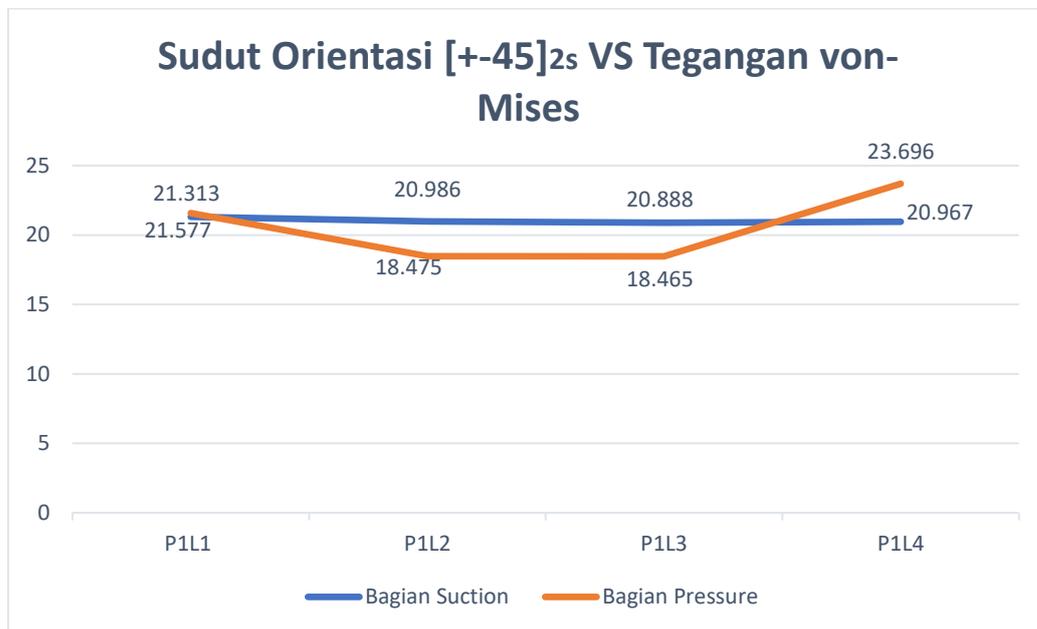
Grafik Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 35^\circ]_2$



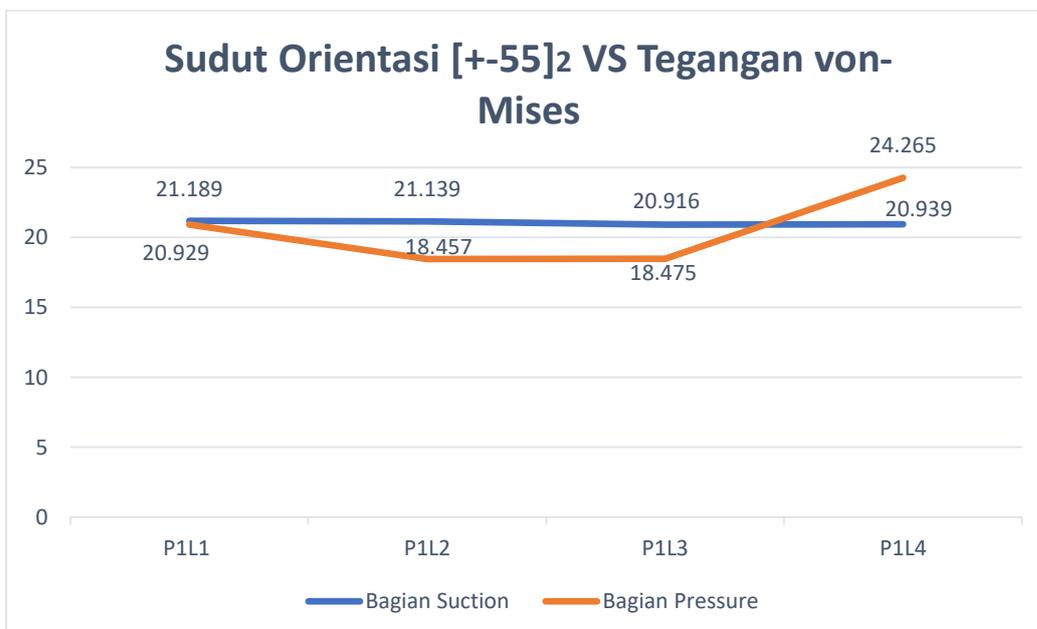
Grafik Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 45^\circ]_2$



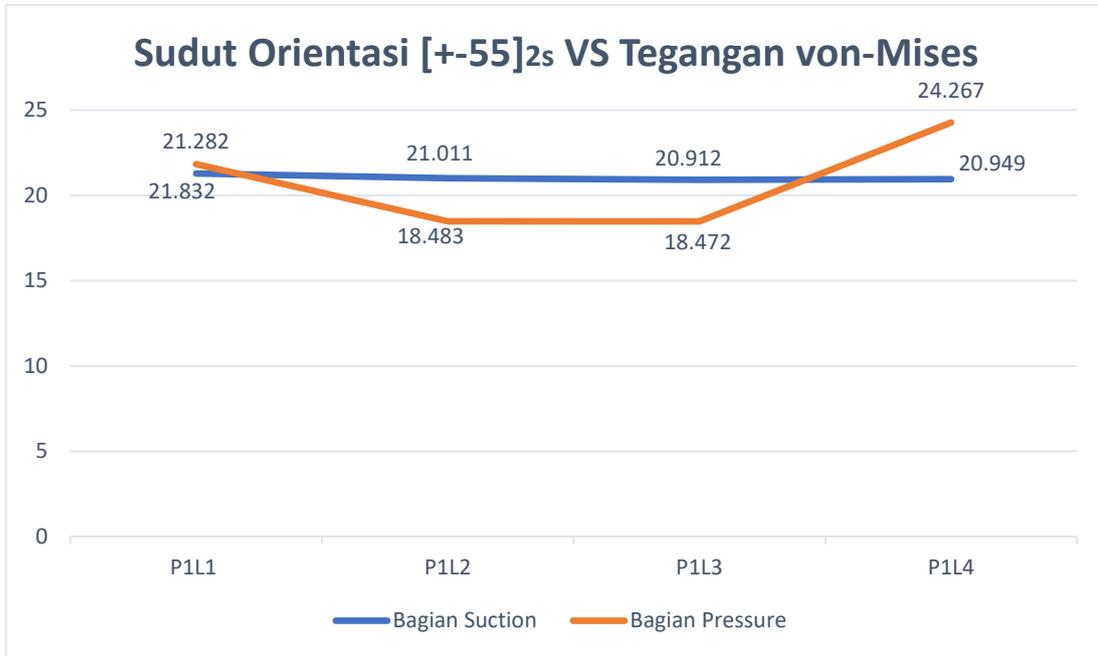
Grafik Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 45^\circ]_{2s}$



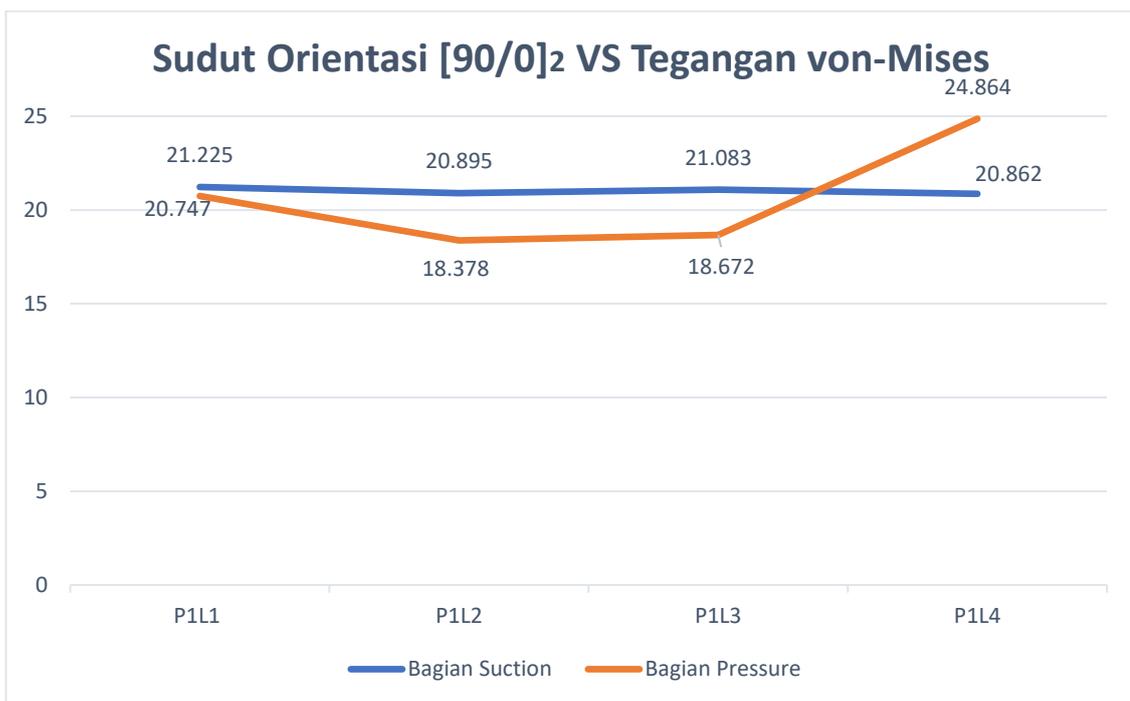
Grafik Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 55^\circ]_2$



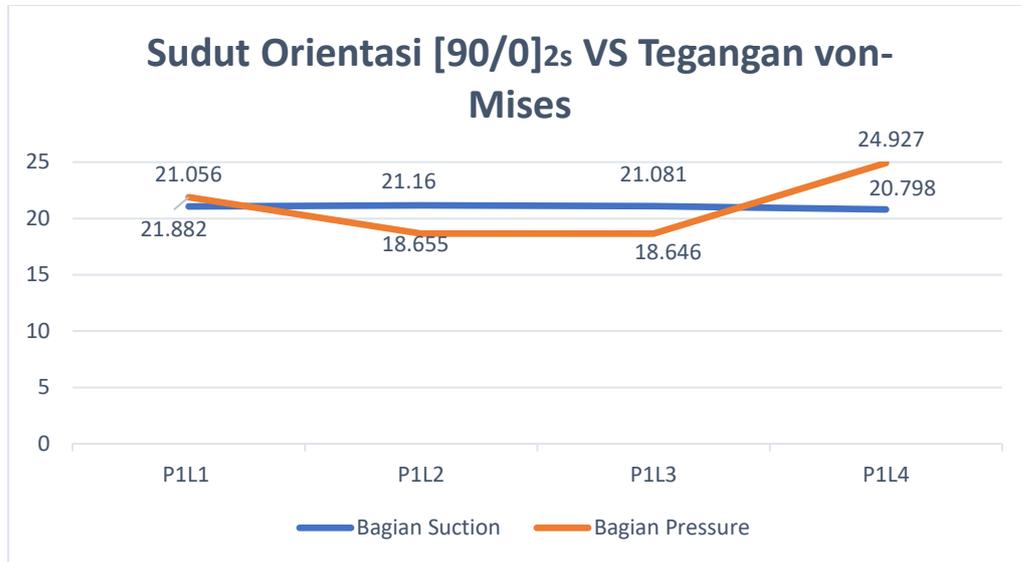
Grafik Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 55^\circ]_2$



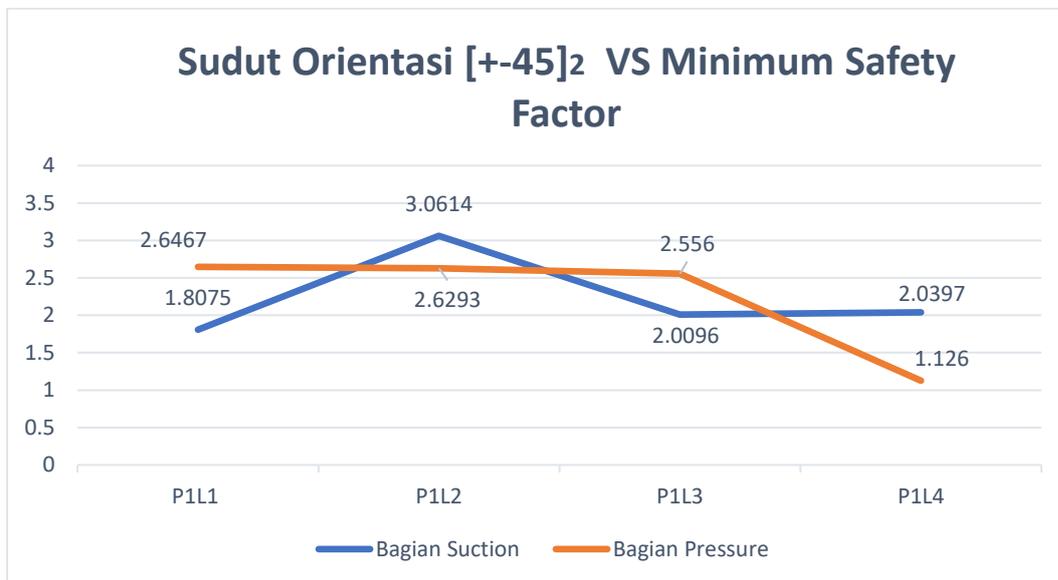
Grafik Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[90^\circ/0^\circ]_2$



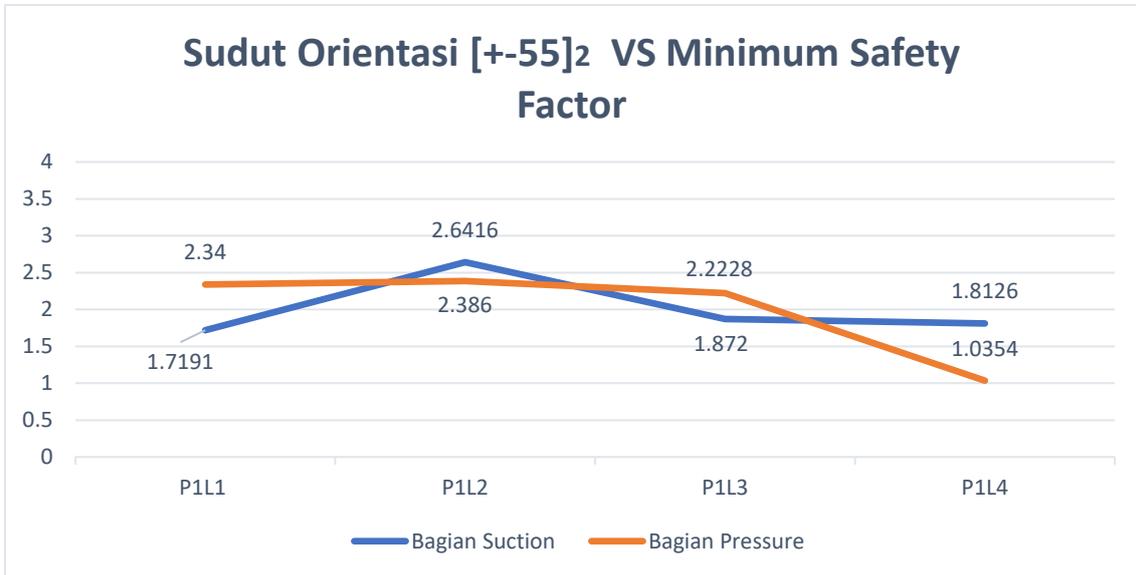
Grafik Distribusi Tegangan von-Mises pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[90^{\circ}/0^{\circ}]_{2s}$



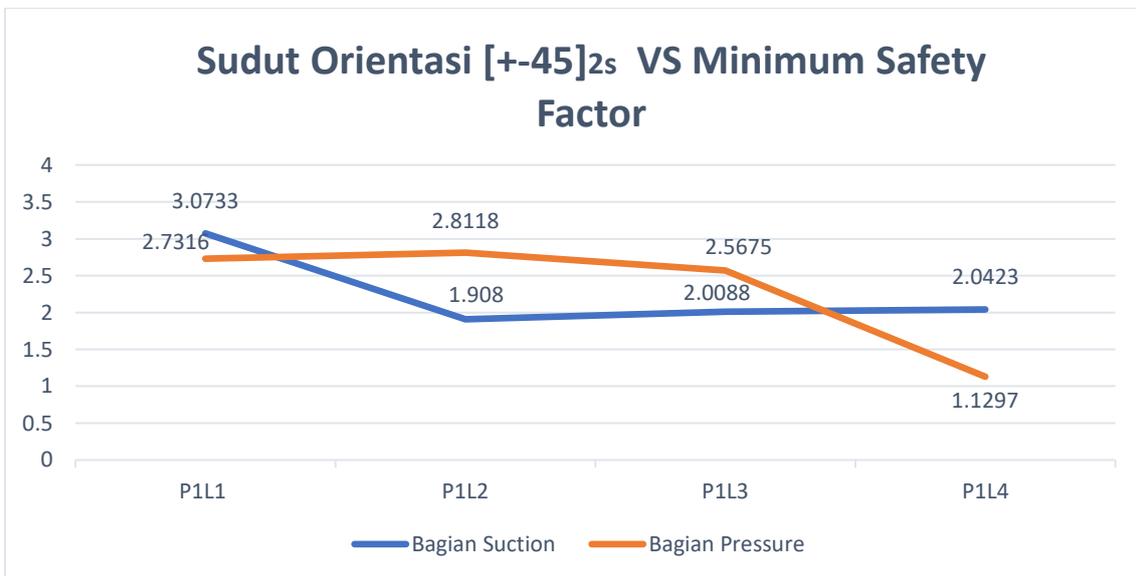
Grafik Distribusi Nilai Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 45^{\circ}]_2$



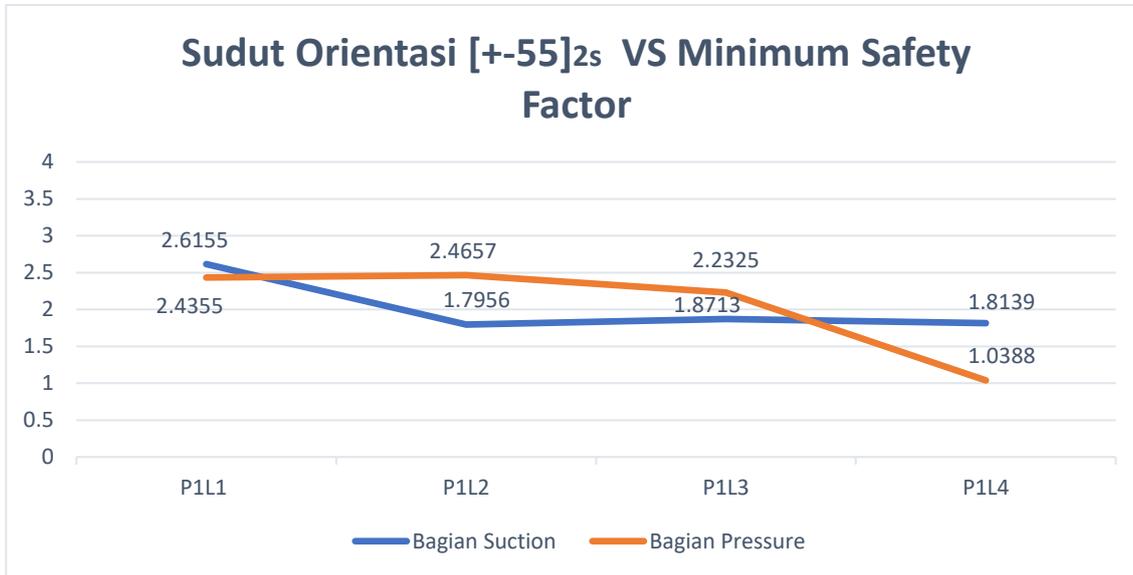
Grafik Distribusi Nilai Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 55^\circ]_2$



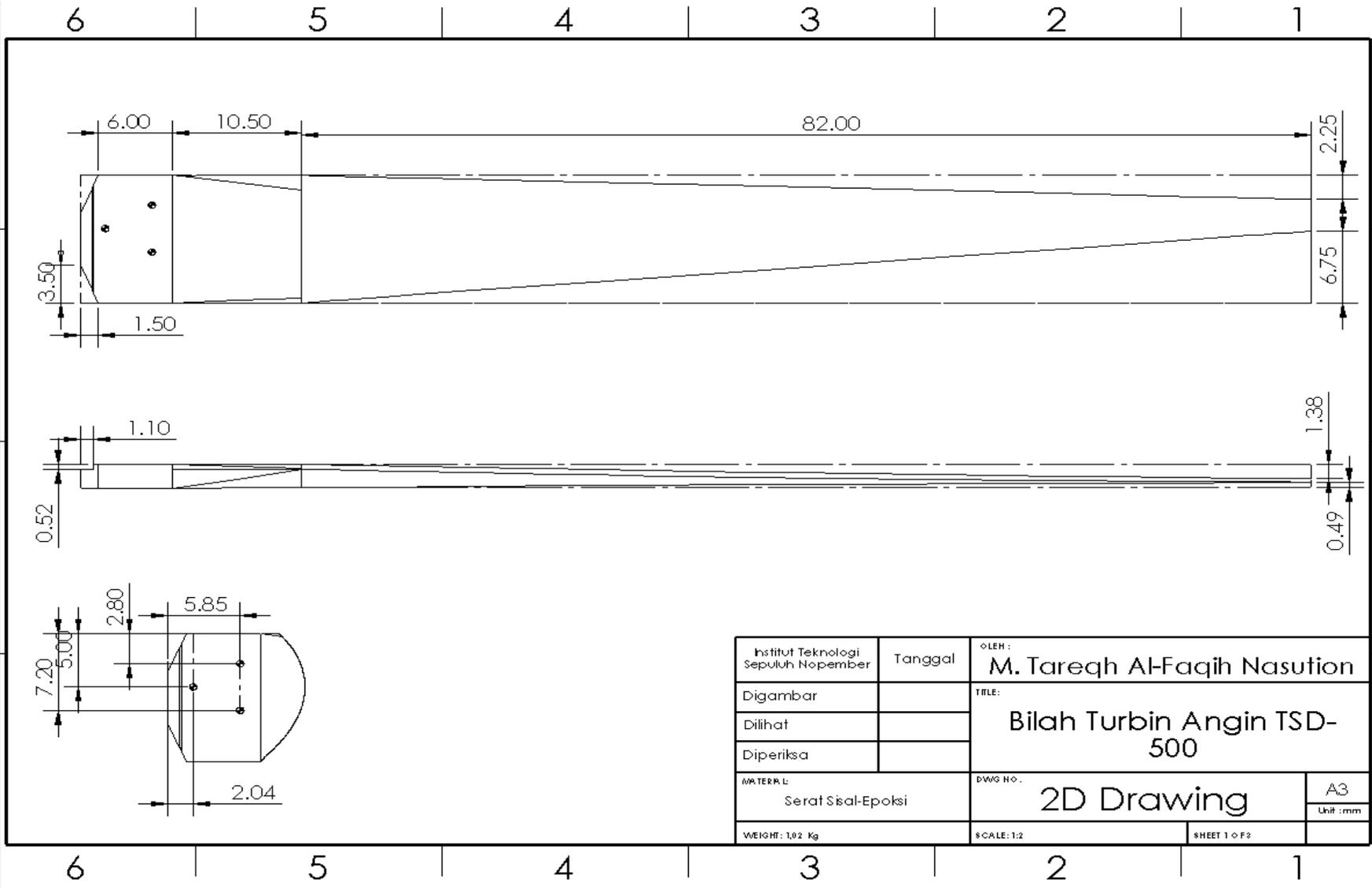
Grafik Distribusi Nilai Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 45^\circ]_{2s}$



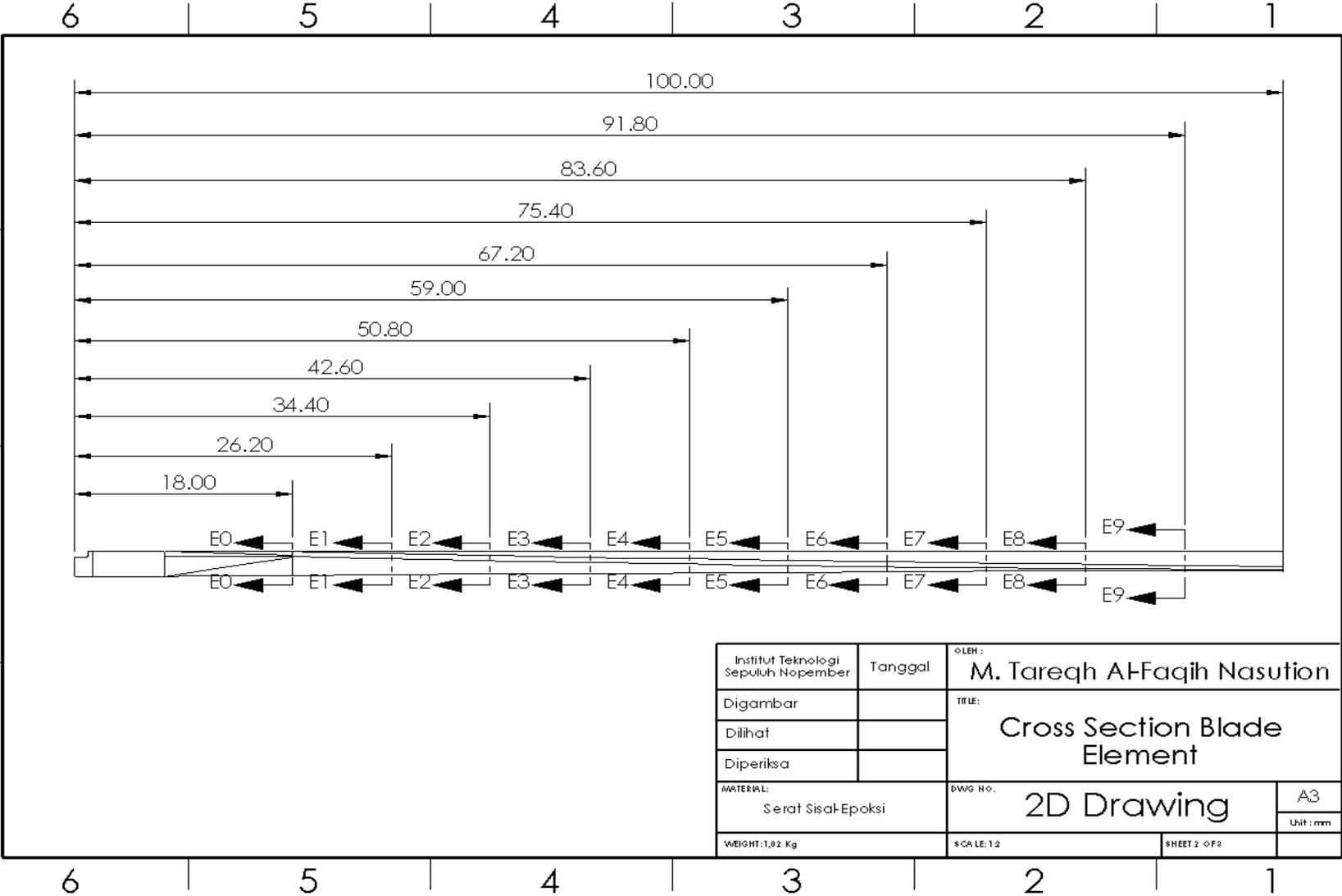
Grafik Distribusi Nilai Safety Factor pada Setiap Layer untuk Sudut Orientasi Komposit  $[\pm 55^\circ]_{2s}$



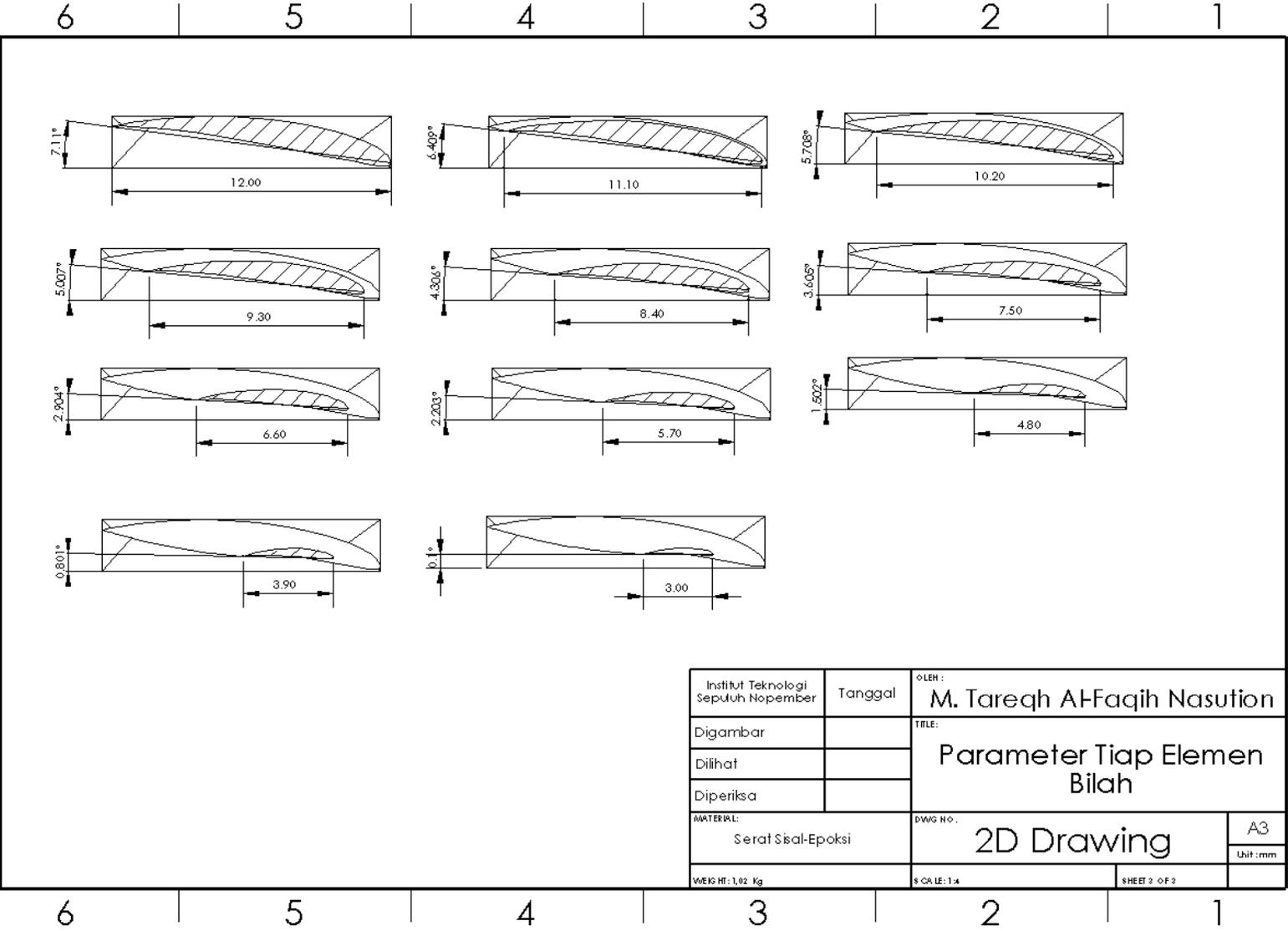
Gambar Teknik Bilah Turbin Angin TSD-500



Gambar Teknik *Cross Section Blade Element*



Gambar Teknik Parameter Tiap Elemen Bilah



## BIODATA PENULIS



Mohammad Tareqh Al-Faqih Nasution adalah anak kedua dari tiga bersaudara pasangan Mohammad Elvin Nasution dan Apriana yang lahir di Pontianak pada 15 September 2000. Penulis telah menempuh Pendidikan di TK Al – Azhar Pontianak, kemudian melanjutkan SD Negeri 1 Jombang di Tangerang Selatan, SMP Negeri 3 Pontianak, SMA Ibnu Hajar Boarding School di Depok, dan mengambil gelar sarjana di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengikuti kegiatan akademik dan non – akademik. Dalam keorganisasian, penulis mengikuti Himpunan Mahasiswa Mesin menjadi staff Departemen Sosial Masyarakat pada tahun 2019-2020. Selanjutnya penulis menjadi Wakil Ketua Himpunan Mahasiswa

Mesin bidang Eksplorasi pada tahun 2020-2021. Selain aktif berorganisasi, Penulis juga memiliki minat dalam bidang pelatihan keterampilan manajemen mahasiswa. Penulis pernah mengikuti LKMM-TL (Tingkat Lanjut) yang diselenggarakan oleh Direktorat Pembelajaran dan Kemahasiswaan (Dirjendikti) pada tanggal 9-11 Desember di Jakarta. Penulis juga berkesempatan melakukan kerja praktik di PT. Petrokimia Gresik pada bulan Juli-Agustus 2021 dan di PT. Lentera Bumi Nusantara (LBN) pada bulan Januari-Februari 2022. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email [faqihnasution1@gmail.com](mailto:faqihnasution1@gmail.com).